



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

**STANOVENÍ MECHANICKÝCH CHARAKTERISTIK  
POVLAKŮ IMPULSNÍ EXCITAČNÍ METODOU**

DETERMINATION OF MECHANICAL CHARACTERISTICS OF COATINGS USING IMPULSE EXCITATION  
TECHNIQUE

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Daniel Valášek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Libor Válka, CSc.**

**BRNO 2021**



# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav materiálových věd a inženýrství  
Student: **Bc. Daniel Valášek**  
Studijní program: Aplikované vědy v inženýrství  
Studijní obor: Materiálové inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Libor Válka, CSc.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Stanovení mechanických charakteristik povlaků impulsní excitační metodou**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

V případě kompozitních materiálů sendvičového typu je často nutné pro účely dalších výpočtů mít k dispozici materiálové charakteristiky jednotlivých vrstev.

Jejich určení klasickými mechanickými testy je ale obtížné a mnohdy úplně nemožné, zejména v případě tenkých povlaků deponovaných na základním materiálu.

Jednou z možností, jak problém měření elastických konstant tenkých vrstev a systémů substrát–povlak řešit, by mohlo být využití impulsní excitační metody ve spojení s modelovými představami o elastickém chování kompozitních materiálů.

**Cíle diplomové práce:**

1. popsat fyzikální principy a zákonitosti, na nichž je impulsní excitační metoda založena; analyzovat teoretické modely elastického chování kompozitních materiálů,
2. experimentálně určit základní elastické charakteristiky systému substrát–povlak pro několik tloušťek povlaku; spolupracovat při výrobě vzorkového materiálu (Cold Spray, příp. jiná aditivní technologie),
3. na základě získaných výsledků a s využitím teorie elasticity určit elastické charakteristiky jednotlivých vrstev systému substrát–povlak; potvrdit či vyvrátit použitelnost metodiky pro měření elastických vlastností povlaků.

**Seznam doporučené literatury:**

HAUERT, A., A. ROSSOLL and A. MORTENSEN. Young's modulus of ceramic particle reinforced aluminium: Measurement by the Impulse Excitation Technique and confrontation with analytical models. Composites. Part A, Applied science and manufacturing. Elsevier, 2009, 40(4), 524-529. ISSN 1359-835X.

PEREIRA, I. Overview on Determination of Elastic and Damping Properties of Different Materials using Impulse Excitation Technique. U.Porto Journal of Engineering. Universidade do Porto, 2017, 3(3), 35-41. ISSN 2183-6493.

ALFANO, M. and L. PAGNOTTA. An Inverse Procedure for Determining the Material Constants of Isotropic Square Plates by Impulse Excitation of Vibration. Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, 2005, 3-4, 287-292 . ISBN 9780878499878. ISSN 1660-9336.

ROEBBEN, G., B. BOLLEN, A. BREBELS, J. VAN HUMBEECK and O. VAN DER BIEST. Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. Review of Scientific Instruments. American Institute of Physics, 1997, 68(12), 4511-4515. ISSN 0034-6748.

TOGNANA, S., W. SALGUEIRO, A. SOMOZA and A. MARZOCCA. Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. Materials science & engineering. A, Structural materials: properties, microstructure and processing. Elsevier B.V, 2010, 527(18-19), 4619-4623. ISSN 0921-5093.

SWARNAKAR, A. K., S. GIMÉNEZ, S. SALEHI, J. VLEUGELS and O. VAN DER BIEST. Recent advances in material characterization using the Impulse Excitation Technique (IET). In: Key Engineering Materials, 2007, 235-238. ISSN 10139826.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty



## **Abstrakt**

V diplomové práci je řešeno určování modulu pružnosti v tahu povlaku pomocí impulzní excitační metody (IEM). V teoretické části práce jsou rozebírány technologie přípravy nástřiků, teoretické základy impulzní excitační metody a modely kompozitních materiálů. Experimentální část práce je zaměřena na určování modulu pružnosti v tahu měděného nástřiku, vytvořeného pomocí technologie Cold Spray. Pomocí impulzní excitační metody bylo otestováno patnáct vzorků s nástřiky o tloušťkách přibližně 0,4 až 2 mm. Hodnoty modulu pružnosti v tahu vzorků, tj. systému substrát + povlak, změřené pomocí impulzní excitační metody, byly vyhodnoceny s využitím pěti kompozitních modelů s cílem určit modul pružnosti v tahu naneseného povlaku. Nejlepším z diskutovaných modelů se ukázal být kompozitní model založený na směšovacím pravidle.

## **Klíčová slova**

Impulzní excitační metoda, povlak, cold spray, Youngův modul pružnosti

## **Abstract**

This diploma thesis deals with the determination of the Young's modulus of coatings using the impulse excitation technique (IET). The theoretical part of the thesis describes Cold and Thermal Spray technology, theoretical foundations of the impulse excitation technique and models of composite materials. The experimental part of the thesis deals with the determination of the tensile modulus of copper coating created by Cold Spray technology. The impulse excitation technique has been used to measure fifteen samples with coating thickness ranging approximately from 0,4 to 2 mm. Results from this measurement were evaluated using five composite models to establish the Young's modulus of the applied coating. The best results were achieved by using the composite model based on rule of mixtures (ROM).

## **Keywords**

Impulse excitation technique, coating, cold spray, Young's modulus

VALÁŠEK, Daniel. *Stanovení mechanických charakteristik povlaků impulsní excitační metodou*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132924>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav materiálových věd a inženýrství. Vedoucí práce Libor Válka.



## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Stanovení mechanických charakteristik povlaků impulsní excitační metodou vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v závěru práce.

V Brně dne:

Podpis: .....  
Daniel Valášek

## **Poděkování**

Na tomto místě bych rád poděkoval panu Ing. Liboru Válkovi, CSc za příležitost zpracovat toto téma a jeho cenné rady, poznámky a trpělivost při tvorbě této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval pracovníkům metalografické laboratoře ÚMVI za asistenci při zpracování vzorků a pracovníkům laboratoře mechanických zkoušek ÚMVI za asistenci při měření elastických charakteristik. Na závěr bych rád poděkoval rodině a přátelům za podporu během tvorby diplomové práce a celého studia.



## Obsah

1	Úvod .....	1
2	Cíle práce.....	2
3	Teoretická část.....	3
3.1	Technologie přípravy povlaků.....	3
3.1.1	Cold Spray .....	3
3.1.2	Žárové nástřiky .....	5
3.2	Impulzní excitační metoda.....	8
3.2.1	Vlastnosti povrchových vrstev .....	8
3.2.2	Princip IEM .....	8
3.2.3	Vibrační módy .....	10
3.2.4	Požadavky na vzorek.....	13
3.2.5	Výpočet elastických charakteristik materiálu .....	14
3.2.6	Využití .....	15
3.3	Kompozitní materiály .....	17
3.3.1	Modely elasticity kompozitních materiálů .....	19
3.3.2	Výpočetní modely používané pro určování Youngova modulu pomocí IEM ...	22
4	Experimentální část .....	27
4.1	Výroba a příprava experimentálního materiálu .....	27
4.1.1	Použité materiály .....	27
4.1.2	Cold Spray .....	27
4.1.3	Příprava zkušebních těles .....	28
4.2	Impulzní excitační metoda, experimentální postup .....	29
5	Výsledky.....	32
5.1	Zkouška tahem.....	32
5.2	Parametry vzorků A1 ÷ F3 .....	32
5.3	Data z impulzní excitační metody .....	33
5.4	Výpočet modulu pružnosti v tahu povlaku.....	35
5.4.1	Směšovací pravidlo .....	35
5.4.2	Lopezův model.....	37
5.4.3	Pautrotův model .....	38
5.4.4	Berryho model.....	40
5.4.5	Whitingův model.....	41

5.4.6	Srovnání použitých modelů.....	42
6	Diskuze.....	43
7	Závěr.....	47
8	Literatura .....	48
9	Seznam použitých zkratk a symbolů .....	53
10	Seznam obrázků a tabulek.....	55

# 1 Úvod

V současné době jsou na strojní součásti kladeny stále větší požadavky s ohledem na jejich životnost, trvanlivost a odolnost vůči vnějším vlivům. Jedním ze způsobů, jak lze zlepšit tyto vlastnosti bez použití lepších (ale často i dražších) materiálů, je aplikace povlaků na povrch součástí, což umožňuje zlepšit např. otěruvzdornost, žáruvzdornost, korozní odolnost nebo odolnost proti erozi. Pomocí povlaků lze také zlepšit estetické vlastnosti materiálu jako třeba jeho lesk nebo barvu. Technologií, pomocí kterých lze aplikovat povlaky na materiály, je velké množství. Patří mezi ně například technologie žárových nástřiků, technologie Cold Spray nebo různé druhy naprašování (např. CVD – chemická depozice z plynné fáze nebo PVD – fyzikální depozice z plynné fáze). Po nanesení povlaku je žádoucí zjistit nejen vlastnosti samotného povlaku, ale také vlastnosti celé komponenty s povlakem. Mezi tyto zkoumané vlastnosti patří například tvrdost, lomová houževnatost nebo elastické charakteristiky.

Zatímco pro zjišťování elastických vlastností homogenních materiálů existují už osvědčené a zavedené metody, u povlaků je proces zjišťování jejich vlastností stále ve vývoji. Problémem je převážně malá tloušťka povlaků a vliv substrátu, na kterém je povlak nanesený, na zkoumané vlastnosti. V současné době se pro zjišťování elastických charakteristik, jakou je kupříkladu modul pružnosti, používají indentační nebo vrypové zkoušky. Tyto metody se prokázaly jako funkční, ale mají určité nedostatky – jedná se o metody destruktivní a náchylné na vznik nepřesností při provádění zkoušky a následném vyhodnocování dat. [1]

Z tohoto důvodu jsou vyvíjeny nové metody a postupy, které by umožnily určovat (nejen) elastické charakteristiky povlaků ideálně nedestruktivním způsobem. Jedna z takových metod je impulzní excitační metoda, která umožňuje zjistit řadu materiálových charakteristik díky analýze akustického signálu šířícího se skrze vzorek. Tato metoda je vhodná pro měření elastických charakteristik homogenních materiálů, ale zároveň byly prokázány i jisté úspěchy pro případ nehomogenních (kompozitních) materiálů, což naznačuje, že její využití by mohlo být širší. [2] [3]

Impulzní excitační metodě a jejímu použití pro určování elastických charakteristik povlaků se věnuje tato práce. V teoretické části práce je uvedena charakteristika technologií přípravy povlaků, jsou popsány základní principy impulzní excitační metody a je zde rovněž prezentován rozbor několika modelů kompozitních materiálů. V experimentální části práce je řešeno určování Youngova modulu pružnosti v tahu tenké vrstvy povlaku pomocí impulzní excitační metody a uvedených modelů kompozitů.

## 2 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je ověřit možnost použití impulzní excitační metody pro stanovování elastických charakteristik povlaků, konkrétně Youngova modulu pružnosti v tahu, pomocí modelů elastického chování kompozitů. Pro úspěšné splnění uvedeného záměru je potřeba splnit dílčí cíle práce, mezi které patří:

- popsat fyzikální principy a zákonitosti, na nichž je impulzní excitační metoda založena,
- analyzovat teoretické modely elastického chování kompozitních materiálů,
- vyrobit vzorkový materiál (např. pomocí technologie Cold Spray, případně jiné aditivní technologie),
- experimentálně určit základní elastické charakteristiky systému substrát–povlak pro několik tloušťek povlaku,
- na základě získaných výsledků a s využitím teorie elasticity určit elastické charakteristiky jednotlivých vrstev systému substrát–povlak,
- potvrdit či vyvrátit použitelnost metodiky pro měření elastických vlastností povlaků.

### 3 Teoretická část

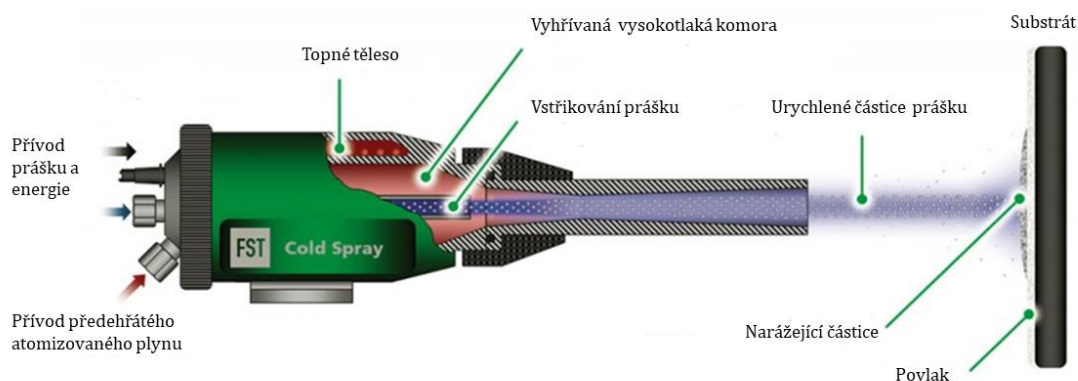
#### 3.1 Technologie přípravy povlaků

Jak již bylo zmíněno v úvodu, povlaky na materiálech slouží ke zlepšení otěruvzdornosti, žáruvzdornosti, korozní odolnosti, odolnost proti erozi nebo jiných vlastností povrchu daného materiálu.

Způsobů, kterými je možné připravovat povlaky, je mnoho a popis všech z nich by byl nad rámec této práce. Z tohoto důvodu se práce zabývá pouze specifickou metodou přípravy povlaků zvanou Cold Spray, které bylo využito při přípravě vzorkového materiálu, a metodou žárových nástřiků, která spadá do stejné skupiny.

##### 3.1.1 Cold Spray

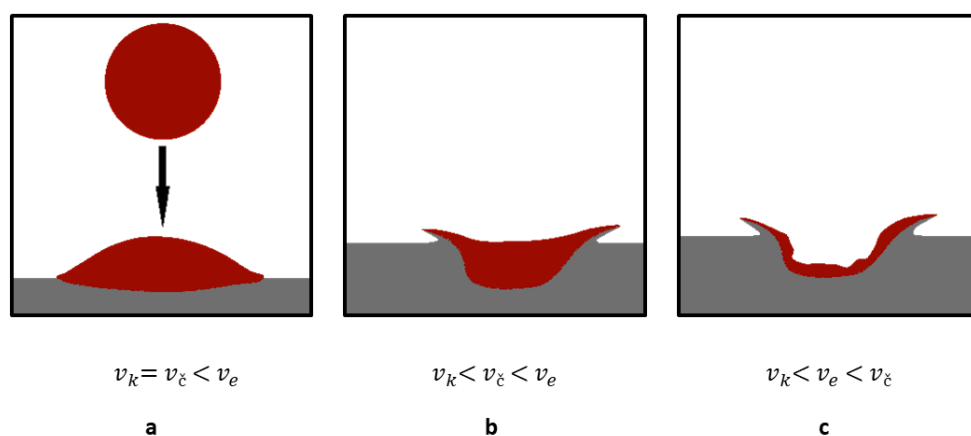
Metoda nanášení nástřiků Cold Spray (kinetická depozice za studena, studená kinetická depozice) je poměrně nová a byla vyvinuta v 80. letech 20. století na Ruské akademii věd. Oproti již zavedeným metodám žárových nástřiků nedochází u Cold Spray (CS) k překročení teploty tavení částic materiálu, který se používá na tvorbu povlaků. Metoda je založena na urychlování částic materiálu na rychlosti vyšší, než je rychlost zvuku (rychlost částic může dosahovat až rychlosti Mach 3). Urychlené částice poté narážejí na substrát, plasticky se deformují, spojují se se substrátem a tvoří na něm souvislý povlak. Přílnavost částic na povrchu substrátu lze zvýšit otryskáním nebo jiným zdrsněním povrchu substrátu. Mechanismus spojení povlaku se substrátem není zcela objasněn, ale předpokládá se, že při velké rychlosti dopadajících částic dochází k proražení ochranné oxidické vrstvy a navázání částic na aktivní povrch substrátu. [4] [5]



Obrázek 3.1 – Sestava pro Cold Spray, převzato a upraveno z [6]

Proces přípravy povlaku je znázorněn na obr. 3.1 [6]. Nejprve je do systému zaveden pracovní plyn (helium, dusík, popřípadě jejich kombinace) o vysokém tlaku a teplotě řádově ve stovkách stupňů Celsia. Poté dochází k přidání materiálu budoucího povlaku ve formě prášku (velikost částic prášku se obvykle pohybuje v rozmezí od 1 do 50  $\mu\text{m}$ ). Tato směs je

následně vpuštěna do Lavalovy dýzy, kde dochází vlivem expanze plynu k přeměně tepelné energie pracovního plynu na energii kinetickou, což má za následek urychlení prášku na vysokou rychlost (300 až 1200 m/s) směrem k substrátu. Právě tato rychlost, na kterou jsou částice prášku urychlovány, je jedním z klíčových parametrů, na nichž závisí úspěšný průběh procesu. Rychlost částic ( $v_c$ ) musí být dostatečná na to, aby došlo k vytvoření spojení mezi dopadající částicí a substrátem. V opačném případě ke spojení nedojde a částice se odrazí. Minimální rychlost, která je k tomuto zapotřebí, se nazývá kritická rychlost ( $v_k$ ) a liší se podle použitých materiálů substrátu a prášku (viz obr. 3.2a [7]). Pokud je použitá rychlost větší než kritická, dochází k větší deformaci částic a lepší přilnavosti k povrchu substrátu (viz obr. 3.2b [7]). Pokud ale rychlost částic značně překročí kritickou rychlost a je dosaženo tzv. erozní rychlosti ( $v_e$ ), částice prášku se již neuchytávají na povrchu, vytvářejí krátery a následně odpadávají, čímž dochází k poničení povrchu a nedochází ke vzniku povlaku požadované kvality (viz obr. 3.2c [7]). Použitá rychlost částic se tedy musí nacházet mezi rychlostí kritickou a rychlostí erozní. Během urychlování a nanášení prášku dochází k jeho zahřátí, ale ne k překročení teploty tavení. [4] [5] [8] [7]



Obrázek 3.2 – Deformace částic v závislosti na jejich rychlosti, převzato a upraveno z [7]

Technologie Cold Spray se využívá na tvorbu povlaků zvyšujících korozivzdornost, otěruvzdornost a odolnost proti vysokým teplotám. Jako materiál na tvorbu povlaků pomocí CS lze použít celou řadu kovů, například Al, Cu, Ni, Ti, Cr, Zn, různé slitiny (např. oceli, slitiny Ni nebo slitiny Al) nebo směs keramických a kovových částic. Povlaky z těchto materiálů se využívají v letectví, automobilovém průmyslu, vojenském průmyslu nebo energetice. Mimo povlakování celých součástí lze tuto technologii použít také k lokální opravě poškozených povlaků nebo součástek. Toto je obzvláště vhodné v letectví, kde se dají opravit jednotlivé komponenty za zlomek výrobní ceny komponenty nové. [4] [9]

V porovnání s metodou žárových nástríků nabízí metoda CS výhodu v tom, že během přípravy povlaku nedochází k natavení částic materiálů, a tudíž nedochází k nežádoucí oxidaci, fázovým přeměnám materiálu povlaku nebo tepelnému ovlivnění substrátu. Díky vysoké rychlosti dopadu a následné plastické deformaci se tvoří povlaky s vyšší hustotou a nižší porozitou než v případě žárových nástríků. Vytvořený povlak má také zbytková tlaková pnutí,



což pomáhá udržovat integritu povlaku a v mnoha případech omezuje vznik a šíření trhlin, zejména únavových. Omezení této technologie spočívají v určitých limitech, které jsou kladeny na substrát a prášek samotný. Například substrát, na který dopadají částice prášku, musí být dostatečně plastický, aby mohlo dojít k jejich zaboření. Také samotný materiál, ze kterého je prášek vyroben, nesmí být příliš křehký a musí být schopen plastické deformace. V případě keramických částic je proto potřeba je nanášet spolu s kovy, které fungují jako pojivo mezi nimi a povrchem substrátu (vznikají tedy tzv. cermety). [4] [5] [10]

### 3.1.2 Žárové nástřiky

Technologie žárových nástřiků vznikla dříve než metoda CS, konkrétně na začátku 20. století, ale největšího vývoje dosáhla až v 50. letech spolu s rozvojem letectví a plazmové technologie. Žárový nástřik je založen na natavování materiálu ve formě prášku či drátu, který je následně urychlován směrem k substrátu. Po nárazu na substrát dochází k adhezi natavených částic na povrch, jejich tuhnutí, vrstvení a tvorbě povlaku na substrátu. Povrch substrátu musí být před aplikací povlaku vyčištěn a odmaštěn, aby na něm povlak dobře držel. V případě, že součást, na níž je povlak aplikován, před procesem prošla tepelným zpracováním, doporučuje se povrch před úpravou otryskat a očistit. Otryskání (popřípadě jiné zdrsňení povrchu) zlepšuje přilnavost mezi povlakem a substrátem. [11] [12] [13]

Žárové nástřiky se dělí podle technologie použité na roztavení nanášeného materiálu. Mezi tyto technologie patří:

- **HVOF** („High Velocity Oxy Fuel“) – vysokorychlostní nástřik s kyslíkem a palivem
- **Plazmový hořák**
- **Elektrický oblouk**
- **Plamen** (např. kyslíko-acetylenový)

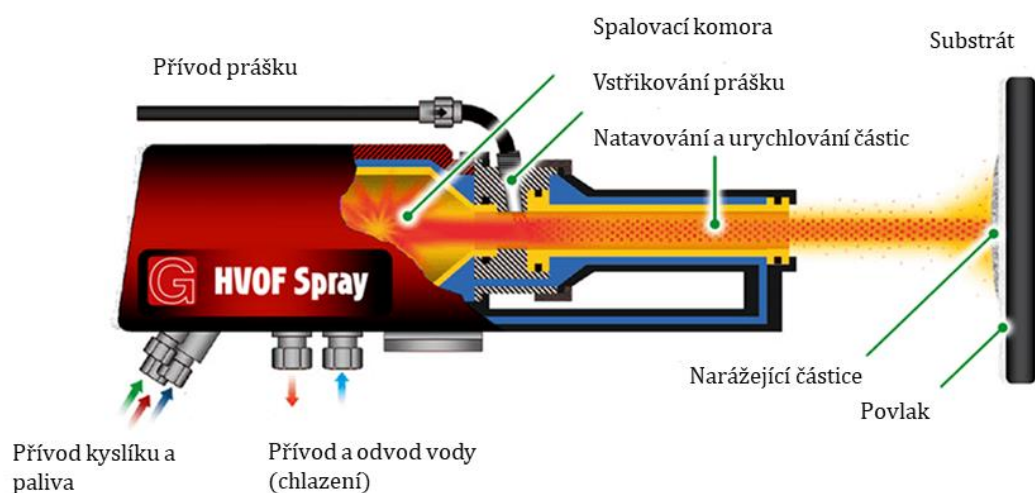
Porovnání vlastností jednotlivých technologií žárových nástřiků lze nalézt v tabulce 1.

Technologie HVOF (neboli vysokorychlostní nástřik s kyslíkem a palivem) je založena na zažehnutí směsi kyslíku s palivem (např. propan, vodík nebo kerosin) ve spalovací komoře. Hořením směsi vznikají v komoře horké plyny, což vyvolává zvýšení tlaku a teploty (teplota v komoře může dosáhnout až 3200 °C). Následně plyn uniká tryskou z komory ven podobně jako u tryskových motorů letadel (viz obr. 3.3 [14]). Po výstupu plynu z komory je do něj přimícháván prášek, který je proudem plynu natavován a urychlován. Podobně jako u technologie Cold Spray, zde může docházet až k nadzvukové rychlosti proudění. Po výstupu z trysky dopadají natavené částice na povrch substrátu, kde se díky kombinaci kinetické a tepelné energie spojují s povrchem, vzniká povlak. Díky dosahování vyšších rychlostí, než je tomu u ostatních metod žárových nástřiků, vznikají tenké povlaky s výbornou adhezí a vysokou hustotou. Obecně je kvalita povlaků vytvořených pomocí technologie HVOF pokládána za nejlepší, jakou lze metodami termálních nástřiků dosáhnout, a je nejbližší kvalitě dosažené s použitím metody CS. Zároveň se ale jedná o technologii s nejvyšší investiční náročností z výše zmíněných a potřebou specializovaného personálu vyškoleného pro ovládání této komplexní metody nanášení. Díky vysoké teplotě v komoře a vysoké rychlosti částic je metoda

vhodná pro nanášení povlaků z karbidů (např. karbid wolframu nebo chromu) nebo povlaků z korozivzdorných ocelí, jako je např. Inconel. [11] [15] [16]

Tabulka 1: Technologie žárových nástřiků (vytvořeno na základě dat z [11] [17] [16])

Zdroj tepla	Materiál povlaku	Forma materiálu	Tloušťka povlaku [mm]	Porozita [%]	Výhody	Nevýhody
<b>HVOF</b>	Kovy, keramika, cermety	Prášek	0,1 ÷ 0,35 (max. 2)	1 ÷ 2	Velmi tenké povlaky s dobrou adhezí a odolností proti korozi	Vysoká cena
<b>Plazma</b>	Kovy, keramika, cermety	Prášek, drát	0,05 ÷ 0,3 (max. 8)	2 ÷ 5	Velká univerzálnost a adaptabilita procesu, dobrá adheze povlaku	
<b>Elektrický oblouk</b>	Čisté kovy nebo slitiny, často Al a Zn	Drát	0,1 ÷ 2 (max. 15)	5 ÷ 10	Lepší adheze než plamen, ale nižší cena než plazma	Omezený výběr materiálů, vyšší porozita
<b>Plamen</b>	Al, Cu, Zn a jejich slitiny, polymery a oceli	Prášek, drát	0,1 ÷ 0,8	5 ÷ 10	Nízká cena	Nízká adheze povlaku, vyšší porozita



Obrázek 3.3 – Technologie HVOF, převzato a upraveno z [14]

Podobně jako jiné aplikace využívající plazmu je technologie žárových nástřiků pomocí plazmy založena na vytvoření elektrického oblouku mezi měděnou anodou a wolframovou katodou, pomocí kterého se následně ionizuje procházející plyn (např. He, Ar, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>). Zahřátý a ionizovaný plyn proudí směrem na substrát a po výstupu z plazmového hořáku je do proudu plynu přisypáván prášek, který je následně natavován a urychlován směrem na substrát, kde po dopadu dochází k tvorbě povlaku. Ze zde zmiňovaných metod se jedná o metodu nejuniverzálnější a lze pomocí ní aplikovat široké množství materiálů, včetně materiálů

s vysokou teplotou tavení, proto je tato obzvláště vhodná pro nanášení keramických povlaků. [11] [16]

Technologie žárových nástřiků pomocí elektrického oblouku je jednodušší než dvě předchozí uvedené technologie. Elektrický oblouk vzniká mezi dvěma elektrodami, které se taví a vzniká roztavený kov, který je proudem vzduchu urychlován směrem na substrát, kde se tvoří povlak. Z pohledu investičních nákladů se jedná o levnější zařízení, než je například technologie plazmového nástřiku, ale jisté omezení této technologie plynou z možnosti nanášet povlaky pouze z určitých kovů a jejich slitin (příklady viz tab. 1) a nemožnost nanášení nevodivých materiálů jako je například keramika. [11] [16]

Nejjednodušší a zároveň nejstarší technologií přípravy žárových nástřiků jsou nástřiky vytvořené pomocí plamene. Na tavení přídavného materiálu používaného na tvorbu povlaku, lze použít různé kombinace plynů jako jsou např. směs kyslíku s acetylenem nebo propanem. Tato technologie je nejsnáze modifikovatelná a zároveň vykazuje nejnižší investiční náročnost z uváděných, což je ale vykoupeno limitovaným množstvím nanášených materiálů a nízkou adhezí připravovaných povlaků. [11]

Žárové nástřiky se podobně jako metoda Cold Spray používají na přípravu povlaků za účelem zlepšení ořezvzdornosti, korozivzdornosti a žáruvzdornosti povrchů, na něž jsou povlaky aplikovány. Po nanesení povlaku zlepšujícího tyto vlastnosti lze u dané součásti dosáhnout výrazného prodloužení životnosti. Žárové nástřiky se využívají v energetice, letectví, chemickém, petrochemickém nebo vojenském průmyslu. [11]

Velkou výhodou technologie žárových nástřiků je to, že na přípravu povlaku lze používat téměř jakýkoliv materiál, který je daný zdroj tepla schopen natavit, ať už se jedná o kovy, keramiku nebo třeba plasty. Mezi další výhody lze zařadit to, že nanášení žárového nástřiku nepoškozuje povrch substrátu, tudíž v případě potřeby (např. špatná kvalita aplikovaného nástřiku) je možné nástřik odstranit a proces zopakovat. Oproti metodě Cold Spray se tedy žárové nástřiky vyznačují větším výběrem materiálů, ale zároveň také větší porozitou a rizikem oxidace nataveného materiálu při přenosu či tuhnutí (toto lze omezit nanášením povlaku ve vakuu). [11]

## 3.2 Impulzní excitační metoda

Impulzní excitační metoda (IEM) je nedestruktivní metoda používaná ke zjišťování elastických charakteristik materiálu, například dynamického modulu pružnosti, modulu pružnosti v tahu apod. Jedná se o rychlou metodu, spadající do kategorie dynamických metod měření, kterou lze použít jak na kovové, tak nekovové materiály.

### 3.2.1 Vlastnosti povrchových vrstev

U povlaků lze měřit a hodnotit různé vlastnosti, mezi které patří tloušťka povlaku, jeho adheze k podkladu, tepelná odolnost apod. Často se také hodnotí estetické vlastnosti povlaků (lesk, barva). V předkládané práci je řešeno určování jedné z nejčastěji požadovaných materiálových charakteristik, Youngova modulu pružnosti v tahu.

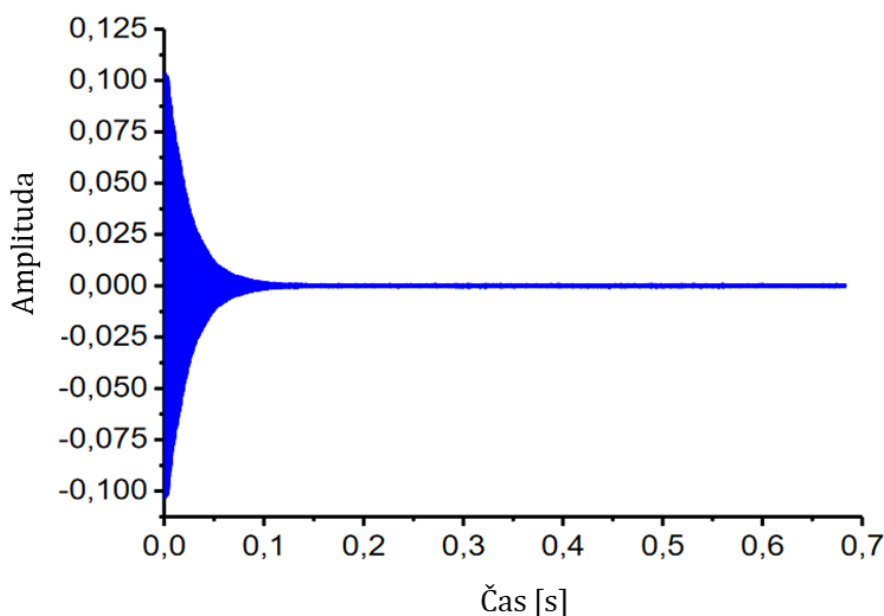
V případě povlaků s relativně velkou tloušťkou je mnohdy možné oddělit povlak od podkladové vrstvy a příslušné charakteristiky měřit na zkušebních tělesech, vyrobených pouze z materiálu povlaku, tj. bez vlivu substrátu. V případě tenkých povlaků není uvedený postup často možný a je nutné použít takové postupy a metody, které umožní měřit materiálové charakteristiky povlaku za přítomnosti substrátu. Velmi často se ke zjišťování modulu pružnosti povlaku používají indentační zkoušky. Pomocí indentace (popř. nanoindentace) lze určit řadu dalších materiálových charakteristik, např. tvrdost, zbytková napětí v povlaku, lomovou houževnatost a další. Při plastické deformaci, vznikající při vtisku indentoru do tenkého povlaku, dochází k ovlivnění oblasti plastické deformace povlaku samotným substrátem, což má za následek zkreslení výsledků nebo snížení přesnosti měření. Čím je povlak tenčí, tím více je měření ovlivňováno substrátem. Je proto doporučováno, aby hloubka indentace nepřesáhla jednu desetinu tloušťky povlaku. Výsledky měření jsou při použití indentačních metod ovlivněny také dalšími faktory, jako třeba nakupením („pile up“), resp. poklesem (sink in“) materiálu kolem hrotu indentoru. Všechny tyto faktory mají vliv na přesnost měření nejen modulu pružnosti, ale i dalších, výše uvedených vlastností. [1] [18]

V oblasti indentace včetně nanoindentace povlaků dochází k neustálému vývoji ve snaze zlepšit přesnost měření a najít nejvhodnější postupy při vyhodnocování experimentálních dat. Zároveň vzniká přirozená snaha vyvíjet, příp. modifikovat alternativní metody určování materiálových charakteristik tenkých povlaků, které by umožňovaly vyhnout se problémům spojeným s indentací (nanoindentací) povlaků a zjednodušit tak určování mechanických vlastností povrchových vrstev různých tlouštěk. Mezi tyto metody lze zařadit i impulzní excitační metodu, použitou v předložené práci.

### 3.2.2 Princip IEM

Princip impulzní excitační metody spočívá v určování základní rezonanční frekvence zkoumaného materiálu. Vzorek je umístěn na podpory a orientován v závislosti na tzv. vibračním módu podle typu měřené veličiny (viz níže). Vzorek je následně excitován, například pomocí úderu kladívka nebo úderem automatického excitátoru. Automatický excitátor obsahuje kuličku nebo váleček, který je pneumaticky (nebo elektromagneticky)

vystřelován na vzorek. Úder nesmí plasticky deformovat vzorek ani jej jinak poškodit. Vibrace vzniklé při excitaci jsou zaznamenány mikrofonom a převedeny na elektrický signál. Místo mikrofonu lze použít jiné zařízení schopné převádět mechanické vibrace na elektrický signál, jako je například kontaktní piezo-senzor nebo laserový vibrometr. Amplitudy vibrací jsou zaznamenány v závislosti na čase (viz graf na obr. 3.4 [19]) a pro následné určení rezonančních frekvencí z vibrací vzorku se využívá principu Fourierovy transformace. Ze zpracovaného záznamu amplitudy na rezonanční frekvenci je izolována základní rezonanční frekvence, ze které lze poté dopočítat jednotlivé elastické charakteristiky, jako jsou modul pružnosti v tahu, ve smyku nebo Poissonův poměr. Další veličinou, kterou lze na základě měřených vibrací pomocí softwaru určit, je vnitřní tření v materiálu ( $Q^{-1}$ ). Tato veličina udává, k jak velkému útlumu vibrací ve vzorku dochází. [3] [20]



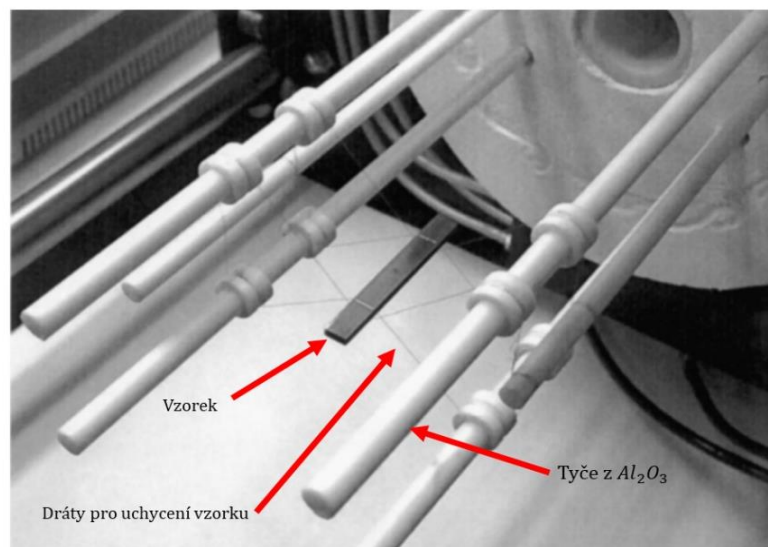
Obrázek 3.4 – Graf závislosti amplitudy vibrací na čase a amplitudy na rezonanční frekvenci, převzato a upraveno z [19]

### Měření elastických charakteristik za zvýšených či snížených teplot

Měření pomocí IEM lze provádět jak za vyšších, tak nižších teplot. Současná zařízení umožňují provádět experimenty v rozsahu teplot přibližně od  $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $1700\text{ }^{\circ}\text{C}$ . V případě provádění experimentu za vyšších teplot je souprava vložena do pece. Vyšším teplotám je také nutno přizpůsobit podpory použité k uchycení vzorku v peci. Většinou se používají tyče z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , popř. jiné druhy keramiky odolávající vysokým teplotám, mezi nimiž je vzorek uchycen pomocí drátů. Příklad sestavy pro měření za zvýšených teplot je uveden na obr. 3.5 [21]. V případě potřeby je možné použít i speciální zařízení s komorou pro inertní plyny nebo vakuum. [20] [21] [30]

Měření za postupně se zvyšující teploty probíhá následovně. Teplota v komoře pece je postupně navyšována konstantním tempem (řádově se jedná o jednotky  $^{\circ}\text{C}$  za minutu) a v pravidelných intervalech (každých několik sekund) dochází k úderu do vzorku a vyhodnocení

základní rezonanční frekvence. Z těchto hodnot je poté sestavena závislost rezonanční frekvence (popř. elastických charakteristik) na teplotě, z níž se zjišťují pochody odehrávající se v materiálu. [22] [20] [21] [23]



Obrázek 3.5 – Sestava pro měření v peci za vyšších teplot, převzato a upraveno z [21]

### 3.2.3 Vibrační módy

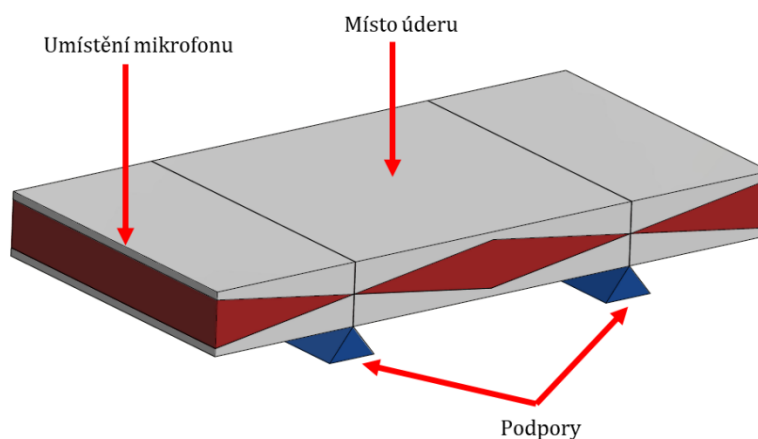
Volba tzv. vibračního módu závisí na typu měřené veličiny. Při měření modulu pružnosti v tahu se používá ohybový mód („flexural mode“), a to buď ohybový mód mimo rovinu („out-of-plane flexure“, viz obr. 3.6 [3]) nebo v rovině („in-plane flexure“, viz obr. 3.7 [3]). V případě měření modulu pružnosti ve smyku se používá torzní mód („torsion mode“, viz obr. 3.8 [3]). Vibrační mód je závislý na tvaru vzorku, místu úderu a umístění podpor. Z tohoto důvodu se experimentální sestavy v závislosti na zvoleném vibračním módu liší právě polohou podpor, umístěním mikrofону a zvoleným místem úderu, jak je patrné z uvedených obrázků. Vzhledem k tomu, že jsou v předložené práci použity vzorky tvaru kvádru, je následující výčet experimentálních uspořádání omezen pouze na uspořádání vhodná pro tento typ vzorků. Na uvedených obrázcích je tmavě červenou barvou schematicky vyznačena vlna šířící se vzorkem. [22]

#### Ohybový mód mimo rovinu

Frekvence vibrací při ohybu je ovlivňována převážně Youngovým modulem ( $E$ ) vzorku v jeho podélném směru, a to nezávisle na jeho případné anizotropii. Lokace podpor pod vzorkem není náhodná. Podpory se nacházejí v pozicích tzv. uzlů, což jsou místa, která při průchodu vlny nevykonávají pohyb, jelikož zde dochází k destruktivní interferenci vlnění. Vlna má v daném místě minimální amplitudu, a tedy zde dochází i k minimální vibraci. V poloviční vzdálenosti mezi dvěma uzly se nachází tzv. kmitna, což je místo, které při průchodu vlny vykonává pohyb s maximální amplitudou, dochází zde ke konstruktivní interferenci, a tedy

k maximální vibraci. Právě do místa kmitny je umísťován mikrofón, který vibrace zaznamenává. [3] [22] [24]

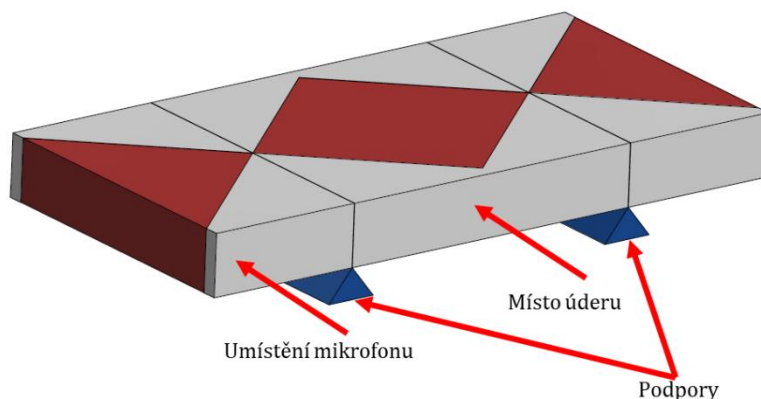
Pro zjišťování nejnižší rezonanční frekvence, jež se nazývá základní rezonanční frekvence, se uzly (a tedy i podpory) nacházejí ve vzdálenosti  $0,224 \times L$  od každého z konců vzorku, kde  $L$  značí délku vzorku, viz obr. 3.6 [3]. Pro vyšší rezonanční frekvence, než je základní, se uzly nalézají v jiných vzdálenostech a s rostoucí rezonanční frekvencí roste i počet uzlů a kmiten. Zatímco pro základní rezonanční frekvenci existují uzly dva, pro druhou rezonanční frekvenci už existují uzly tři, pro třetí čtyři atd. Nejčastější sestava pro měření v módu pro ohyb mimo rovinu je tedy s mikrofómem umístěným na jednom z konců vzorku a podpor v již zmíněných pozicích, přičemž k úderu dochází ve středu vzorku. Další možná poloha mikrofónu je ve střední části vzorku. V tomto případě dochází k úderu do vzorku zespod a mikrofón je umístěn nad vzorkem (popřípadě lze tyto pozice zaměnit). [3] [22]



Obrázek 3.6 – Sestava pro ohybový mód mimo rovinu, upraveno dle [3]

### Ohybový mód v rovině

Princip šíření vln popsany u ohybového módu mimo rovinu platí také u ohybového módu v rovině s tím rozdílem, že vlna se nešíří skrz tloušťku vzorku, ale skrz jeho šířku. Rozložení je principiálně stejné – podpory se nacházejí v místech uzlů a mikrofón v místě kmitny. Oproti ohybu mimo rovinu se v tomto případě liší pouze plocha, na které je umístěn mikrofón, a místo, kde dochází k úderu do vzorku, jak je patrné z obr. 3.7 [3]. Ohybový mód v rovině lze využít pro ověření správnosti modulu pružnosti získaného pomocí ohybového modulu mimo rovinu či obráceně. [3] [22]

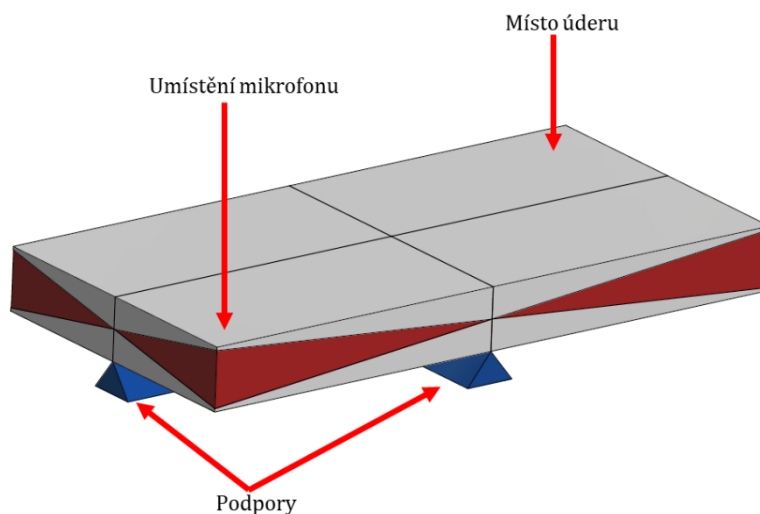


Obrázek 3.7 – Sestava pro ohybový mód v rovině, upraveno dle [3]

### Torzní mód

Frekvence vibrací při torzi je ovlivňována převážně modulem pružnosti ve smyku ( $G$ ) vzorku, ale pouze v případě, že se jedná o izotropní vzorek. V případě anizotropního vzorku je doporučováno umístit vzorek tak, aby hlavní osa vzorku byla rovnoběžně s osou anizotropie. Pro zjištění modulu pružnosti ve smyku je třeba, aby ve vzorku došlo vlivem úderu ke krutu, proto je nutné, aby došlo jak ke změně umístění podpor, tak ke změně místa úderu a také mikrofону. Experimentální uspořádání pro měření materiálových charakteristik v tomto módu je komplikovanější. Uzly potřebné pro nalezení základní rezonanční frekvence pro torzní mód se nacházejí v osách hlavní roviny použitého vzorku, jak je zřejmé z obr. 3.8 [3]. K úderu tedy dochází v jednom z rohů vzorku, zatímco mikrofón je umístěn v rohu protějším. Oba jsou umístěny v pozicích kmitny. [3] [22]

Existuje alternativa, jak měřit modul pružnosti ve smyku při použití sestavy pro ohybový mód. Tato alternativa vychází z faktu, že druhá rezonanční frekvence pro torzní mód má uzly na podobných pozicích jako základní rezonanční frekvence u ohybového módu, tudíž lze při měření se sestavou pro ohybový mód zjistit také frekvenci pro mód torzní. [22]

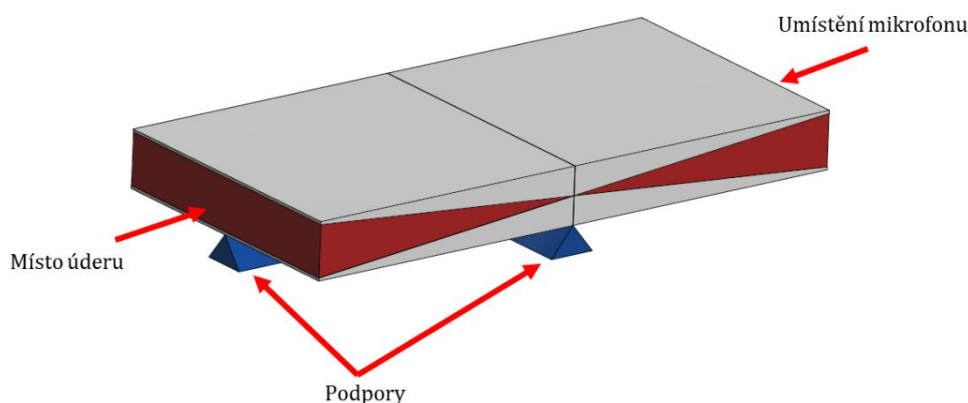


Obrázek 3.8 – Sestava pro torzní mód, upraveno dle [3]



## Podélný mód

Frekvence podélných vibrací, tj. vibrací ve směru délky vzorku v materiálu jsou ovlivňovány Youngovým modulem a Poissonovým poměrem v podélném směru vzorku. Tento mód lze tedy alternativně použít k výpočtu modulu pružnosti v tahu. Nepoužívá se ale často, jelikož výpočetní rovnice pro získání Youngova modulu pro podélný mód nejsou tak přesné jako pro mód ohybový. V práci [22] je sice uvedena rovnice, která umožňuje výpočet Youngova modulu s požadovanou přesností, ta ale platí pouze pro vzorky, jejichž tloušťka přibližně odpovídá jejich šířce (tedy vzorky se čtvercovým průřezem) a jejichž poměry tloušťka ku délce a šířka ku délce jsou oba výrazně menší než jedna. [22] Schematické znázornění sestavy pro měření v podélném módu vibrací je uvedeno na obr. 3.9 [3].



Obrázek 3.9 – Sestava pro podélný mód, upraveno dle [3]

### 3.2.4 Požadavky na vzorek

Impulzní excitační metodu je doporučeno používat pouze v případě homogenních, izotropních materiálů vykazujících elastické chování. V případě použití pro nehomogenní materiály (například kompozity), je nutno zvážit vliv nehomogenity materiálu na výslednou přesnost výsledků. U materiálů vykazujících nadměrnou schopnost tlumení vibrací může dojít k utlumení vibrací předtím, než dojde k jejich zachycení mikrofonom a analýze signálu. Mezi další faktory ovlivňující výslednou přesnost patří například kvalita povrchu vzorku (je požadována nízká drsnost povrchu) nebo povrchové úpravy vzorku. [3] [22]

Rezonanční frekvence je závislá na tvaru, rozměrech, hmotnosti a daných elastických vlastnostech vzorku. Mezi preferované tvary vzorků patří kvádr, válec, popřípadě disk, jelikož u jmenovaných jednoduchých tvarů platí přímý vztah mezi rezonanční frekvencí, rozměry, elastickými vlastnostmi a hmotností, zatímco u vzorků komplexních tvarů tento vztah platit nemusí. Rozměry vzorků se pohybují od milimetrů do centimetrů. Dále je třeba mít na paměti, že samotné rozměry vzorků a jejich hmotnost jsou také limitované podporami, na které se vzorky ukládají. [3] [20]

Existují dva různé typy podpor a uchycení vzorku. První typ využívá válečků z polymerové pěny, na které je vzorek položen, druhý typ využívá uchycení vzorku pomocí

drátů nebo vláken. Výhodou druhého typu je především to, že ho lze používat i za vyšších teplot a díky lepší fixaci vzorku je také možno experiment opakovat téměř okamžitě bez obav týkajících se správného umístění podpor při dalším úderu. Umístění podpor, mikrofonu a nástroje vyvolávajícího impuls má přímý vliv na přesnost vypočítaných hodnot elastických charakteristik. Pro dosažení dobré přesnosti je nutné, aby se mikrofón nenacházel nad žádnou podporou, a to v žádném z používaných módů měření. Zároveň je také nutné, aby vzorek nebyl napevno uchycen, měl volné konce a mohl volně vibrovat. [3] [22] [20]

### 3.2.5 Výpočet elastických charakteristik materiálu

Protože byla v experimentální části práce použita pouze zkušební tělesa ve tvaru kvádrů, jsou dále v práci uvedeny pouze vztahy a zákonitosti, platné pro tento tvar těles. Výpočetní vztahy pro vzorky jiného tvaru (válce nebo disku) se liší v použitých konstantách a vztazích pro výpočet korekčních faktorů, viz např. [3].

#### Modul pružnosti v tahu E

Modul pružnosti v tahu je definován jako míra tuhosti meziatomových vazeb v daném materiálu, tudíž se liší podle typu vazby v daném materiálu. Keramické materiály, které jsou založeny převážně na kovalentní vazbě, mají vyšší modul pružnosti než kovy, u nichž je dominantní vazba kovová, která je slabší. [25] Modul pružnosti v tahu je při měření pomocí IEM dopočítáván pomocí rovnice

$$E = 0,9465 \left( \frac{mf_{RF}^2}{b} \right) \left( \frac{L^3}{t^3} \right) T, \quad (3.1)$$

kde  $f_{RF}$  je rezonanční frekvence zjištěná v ohybovém módu měření,  $m$  je hmotnost vzorku,  $b$ ,  $L$  a  $t$  jsou šířka, délka a tloušťka vzorku a  $T$  je korekční faktor. Pokud  $L/t \geq 20$ , lze  $T$  vypočítat z tloušťky a délky vzorku, v opačném případě je třeba použít také Poissonův poměr vzorku, který je nutno odhadnout a následně zjistit iterativním postupem. Oba vztahy potřebné pro výpočet korekčních faktorů lze najít v normě ASTM E-1876 [3].

Alternativně lze použít pro vzorky čtvercového průřezu rovnici

$$E = 4mf_{RL}^2 \left( \frac{L}{btK} \right), \quad (3.2)$$

ve které  $f_{RL}$  je rezonanční frekvence zjištěná v podélném směru a  $K$  je korekční faktor, který lze vypočítat pomocí šířky, délky, tloušťky a Poissonova poměru materiálu vzorku na základě vzorce uvedeného v normě ASTM E-1876 [3].

#### Modul pružnosti ve smyku G

Modul pružnosti ve smyku je při měření pomocí IEM dopočítáván pomocí rovnice

$$G = \frac{4Lmf_{RT}^2}{bt} R, \quad (3.3)$$

kde  $f_{RT}$  je rezonanční frekvence zjištěná v torzním módu měření a  $R$  korekční faktor, který lze vypočítat z šířky, délky a tloušťky vzorku, pomocí vzorce z normy ASTM E-1876 [3].

### Poissonův poměr

Poissonův poměr je definován jako poměr příčného zúžení ku podélnému prodloužení při elastické deformaci. [25] Poissonův poměr pro izotropní materiál lze dopočítat podle rovnice

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1 \quad (3.4)$$

z hodnot modulů pružnosti v tahu a ve smyku zjištěných během měření [3].

### Přesnost výpočtů

Přesnost určení elastických charakteristik je závislá na přesnosti hodnot vstupujících do jednotlivých rovnic. Jako teoreticky dosažitelná přesnost určení elastické charakteristiky je uvedena hodnota  $\pm 1 \%$  [22], a to za předpokladu, že parametry vstupující do vzorců jsou o řád přesnější. Zatímco přesnost určení rezonanční frekvence je dána softwarem, přesnost zachycení vibrací je dána použitým záznamovým zařízením (např. mikrofonom). Na zachycené vibrace mohou mít také negativní vliv faktory jako nedostatečná tuhost měřící sestavy anebo náhodné vibrace (hluk) v okolí přístroje. Požadované přesnosti měření lze také dosáhnout při určování hmotnosti vzorku. Nejkomplikovanější je dodržení této přesnosti u měření rozměrů vzorku, kde nejproblematictější bývá měření tloušťky. Proto se doporučuje, aby v případě vzorků ve tvaru kváдру byla tloušťka vzorku alespoň 2 mm. Tloušťka vystupuje v rovnici pro výpočet Youngova modulu ve jmenovateli zlomku ve třetí mocnině, tudíž jakákoliv chyba při měření tloušťky se ve výpočtu výrazně projeví. Teoretická hodnota dosažitelné přesnosti ale nebere v potaz nedokonalost samotného zkušebního tělesa, např. drsnost povrchu vzorku nebo proměnlivost porozity ve vzorku, které mohou způsobovat snížení přesnosti určené elastické charakteristiky. [22]

#### 3.2.6 Využití

IEM je díky své rychlosti, jednoduchosti a dobré reprodukovatelnosti výsledků používána jak v průmyslu, tak ve výzkumných střediscích. Mimo již zmíněné využití k určování základních rezonančních frekvencí a následnému zjišťování elastických charakteristik nachází tato metoda uplatnění také v oblasti kontroly kvality nebo zkoumání možného poškození (např. trhlin) uvnitř zkoumaného materiálu (komponenty), k čemuž se používají naměřené hodnoty vnitřního tření. Pomocí postupného měření za zvyšující se teploty lze také zkoumat, při jakých teplotách v materiálu dochází k fázovým transformacím. [26]

V posledních letech se testují možnosti využití metody pro určování elastických charakteristik kompozitních materiálů. Metoda byla například úspěšně použita pro určení modulu pružnosti kompozitů skládajících se z epoxidové matrice a měděných částic velikosti přibližně sta mikrometrů. [2] Dále byla IEM také úspěšně použita pro stanovení lokálních

elastických charakteristik laminátového kompozitu, což by v budoucnu mohlo výrazně zjednodušit kontroly kvality a poškození výrobků z kompozitních materiálů. [27]

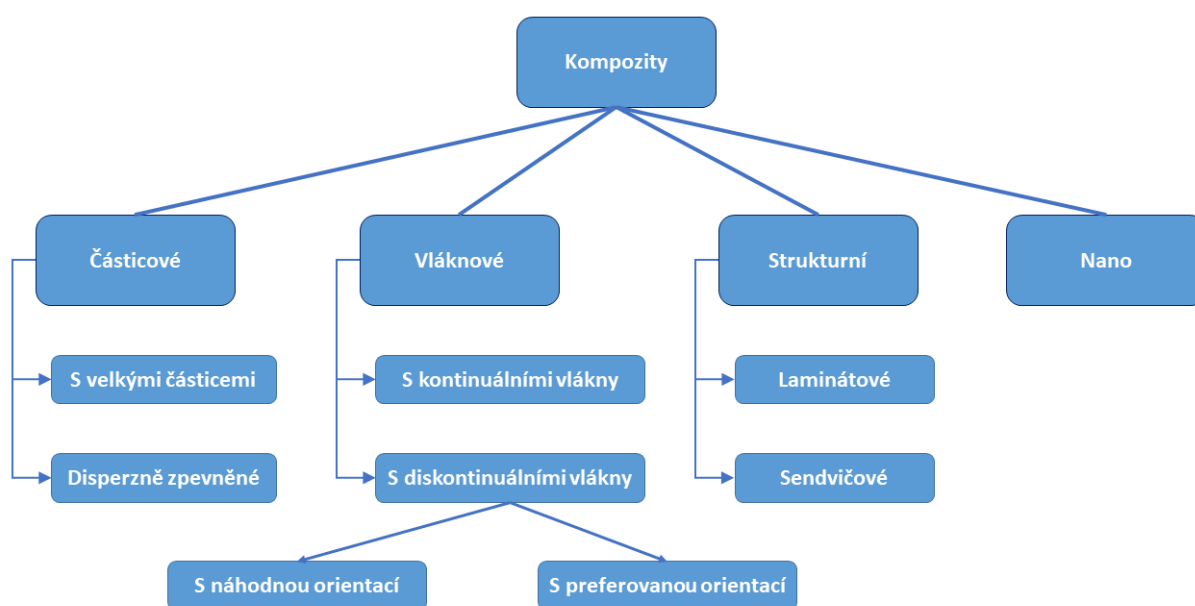
Oproti statickým metodám zjišťování modulu pružnosti, jako je třeba tahová zkouška, nezabírá zkušební souprava pro IEM tolik místa a zároveň lze používat vzorky jednodušších tvarů (válec, kvádr) než v případě normovaných tahových těles. Lze ji použít nejenom na houževnaté materiály, jako jsou kovy, ale také na křehké vzorky z keramických materiálů, u nichž je zjišťování modulu pružnosti tahovou zkouškou komplikované. Další výhodou je nepochybně to, že se jedná o nedestruktivní metodu zkoušení materiálu, tudíž lze zkoumaný vzorek po měření podrobit dalším nedestruktivním nebo destruktivním zkouškám, případně je možné znova opakovat měření pomocí IEM na stejném vzorku. [26]

Mezi nevýhody této metody se řadí omezená velikost a hmotnost vzorků, nemožnost použití vzorků složitějších tvarů a snížení přesnosti v případě nehomogenního, popřípadě neizotropního materiálu. [3]

### 3.3 Kompozitní materiály

Kompozitní materiál neboli kompozit je materiál skládající se ze dvou či více složek, kde každá složka má odlišnou funkci, odlišné vlastnosti a jednotlivé složky jsou od sebe jasně rozeznatelné. Kompozit se skládá z matrice a ze složky plnící funkci výztuže (např. vlákna). Za učebnicový příklad lze považovat houževnatou polymerní matici a vyztužující skelná vlákna s pevností větší, než je daná matrice. Právě podle typů výztuže lze kompozity rozdělit do kategorií, kterými jsou kompozity částicové, vláknové, strukturní či nanokompozity. [28] [29] Toto rozdělení je spolu s detailnějším dělením jednotlivých kategorií znázorněno na obr. 3.10 [29]. V předložené práci je za kompozit považována dvojice substrát–povlak.

Kompozity lze také dělit podle typu materiálu, ze kterého je vyrobena jejich matrice, a to na kompozity s kovovou, keramickou, polymerní nebo uhlíkovou maticí. Nejčastěji používané jsou kovové či polymerní matrice, jelikož u matrice bývá většinou vyžadována vyšší houževnatost nebo plasticita než u vláken, která bývají křehčí a pevnější. Naopak kompozity s křehkou keramickou maticí většinou zahrnují částice nebo vlákna, která jsou houževnatá, a zlepšují tak celkovou houževnatost kompozitu. Kompozitní materiály díky kombinaci charakteristik jednotlivých složek umožňují dosáhnout vlastností, které by byly pro jednotlivé složky nedosažitelné, například dobrá pevnost a houževnatost při nízké hmotnosti, což je výhodné např. v leteckém průmyslu. [29]



Obrázek 3.10 – Dělení kompozitů, upraveno dle [29]

#### Částicové kompozity

Částicové kompozity se skládají z matrice a výztuže ve formě částic. Tyto částice mohou být makroskopických rozměrů a pak dochází k přenosu napětí z matrice na částice (podobně jako u vláknových kompozitů) nebo mikroskopických rozměrů, kdy vyztužují

kompozit na atomární úrovni pomocí disperzního zpevnění. Nejznámějším kompozitem vyztuženým částicemi makroskopických rozměrů je beton. Mezi kompozity s mikroskopickými částicemi se řadí kupříkladu keramické částice rozprostřené v kovové matici, které jsou používány například při výrobě rezných nástrojů. U částicových kompozitů je důležité, aby částice byly rovnoměrně rozprostřeny v matici. [29]

### **Vláknové kompozity**

Vláknové kompozity se skládají z matrice a výztuže ve formě vláken. Tato vlákna mohou být buď kontinuální (spojitá) nebo diskontinuální (nespojité). Výsledné vlastnosti kompozitu záleží na orientaci jeho vláken. Zatímco kontinuální vlákna jsou orientovaná vždy, tak diskontinuální vlákna mohou být jak orientovaná, tak neorientovaná. Orientace vláken, jejich distribuce a množství v matici má přímý vliv na výsledné vlastnosti kompozitu, jako je např. jeho pevnost. Mezi typicky používaná vlákna se řadí uhlíková, aramidová nebo keramická vlákna. [29]

### **Strukturní kompozity**

Strukturní kompozity se skládají z matrice a několika vrstev výztuže, která je zakomponovaná do struktury kompozitu. Tato kategorie kompozitů má dvě podkategorie, a to lamináty, u kterých jsou vrstvy výztuže pokládány na povrch materiálu matrice, a sendvičové kompozity, kde se vrstva matrice nachází mezi dvěma vrstvami výztuže. [29]

Jednotlivé vrstvy laminátových kompozitů mají určitý směr, ve kterém jsou jejich užité vlastnosti maximální, např. pevnost. Aby bylo u laminátů dosaženo izotropních vlastností, dochází k pokládání jednotlivých vrstev, tj. desek s vlákny výztuže s různou orientací vláken na sebe takovým způsobem, aby výsledný kompozit disponoval výhodnými užitnými vlastnostmi ve více směrech. Pokud není všesměrovost vlastností kompozitu vyžadována, lze na sebe položit i několik vrstev se stejnou orientací vláken. Výsledné vlastnosti laminátu záleží na počtu vrstev, jejich orientaci a použitém materiálu vláken, nacházejících se ve vrstvách. Laminátové kompozity se využívají v letectví, stavebnictví a v automobilovém průmyslu. [29]

Sendvičové kompozity se skládají z dvou vnějších desek, které jsou adhezivně spojeny s vnitřním jádrem. Typické vlastnosti vnějších desek jsou vysoká tuhost a pevnost, zatímco vnitřní komponent je typicky lehčí, s menší pevností a drží celou strukturu pohromadě. Jako materiál na desky lze použít například hliník nebo korozi-vzdornou ocel. Jako materiál jádra bývají naopak voleny levnější a lehčí materiály, kupříkladu polymerové pěny nebo dřevo, případně lze použít voštiny z kovových materiálů, pokud to aplikace vyžaduje. Sendvičové kompozity se využívají v mnoha odvětvích, jako například ve stavebnictví nebo v letectví, kde lze konkrétně zmínit listy rotorů na helikoptérách. [29]

### **Nanokompozity**

Do kategorie nanokompozitů jsou řazeny kompozity, jejichž velikost částic nepřesahuje řád stovek nanometrů. Jako částice do nanokompozitů jsou používány oxidy anorganických látek ve formě nano krystalů (např. hliník, zirkonium nebo titan), uhlík (ve formě grafenu nebo uhlíkových nanotrubic) nebo vrstvené silikáty, jako je například montmorillonit. Přidáním nanočástic do daného materiálu lze zlepšit nejenom jeho mechanické vlastnosti, ale například

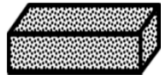




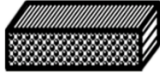
také vlastnosti elektrické, magnetické nebo optické. Na kvalitu vlastností nanokompozitů má vliv převážně množství a rovnoměrné rozložení nanočástic v matrici. Nanokompozity se používají např. v lithium-iontových bateriích, nehořlavých povlacích nebo v pneumatikách automobilů. [29]

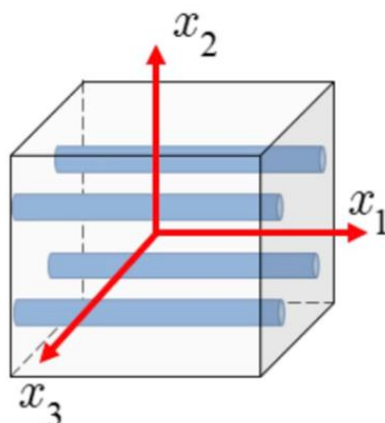
### 3.3.1 Modely elasticity kompozitních materiálů

Při výrobě kompozitních materiálu dochází ke kombinaci dvou nebo více materiálů s rozdílnými vlastnostmi. Pro použití kompozitu je třeba znát jeho vlastnosti jako celku, a nejen jednotlivých složek. Právě pro tyto účely existují v literatuře různé modely, které umožňují výpočet celkových vlastností kompozitu z vlastností jeho složek. Jelikož se tato práce zabývá elastickými charakteristikami a Youngovým modulem, jsou dále rozebírány modely elasticity kompozitních materiálů používané k určování modulu pružnosti v tahu kompozitu na základě znalosti elastických charakteristik jeho složek. Modely jsou platné pouze v případě, že deformace kompozitu, resp. jeho jednotlivých složek je elastická.

Kompozitní materiály jsou často anizotropní a jejich mechanické vlastnosti jsou směrově závislé. Proto je třeba rozlišovat, jaký typ symetrie kompozitní materiál vykazuje, a podle toho určit počet hledaných elastických konstant. Pokud se jedná o izotropní materiál, k určení jeho elastických vlastností jsou potřeba pouze tři elastické charakteristiky, a to modul pružnosti v tahu, modul pružnosti ve smyku a Poissonův poměr. V případě anizotropního materiálu se jedná o 21 elastických konstant. Mimo izotropní a anizotropní materiál existují také materiály transversálně izotropní a ortotropní, jejichž elastické konstanty jsou uvedeny v tab. 2. V posledním sloupci tabulky je uvedeno, které elastické konstanty je možno určit v daném směru pomocí impulzní excitační metody. Směry, ve kterých jsou jednotlivé elastické charakteristiky určovány, jsou standardně voleny podle orientace vláken v kompozitu (pokud kompozit vlákna obsahuje). Směr označený číslicí 1 většinou značí směr podélný vzhledem ke směru vláken v kompozitu. Směr značený číslicí 2 značí směr kolmý (příčný) vzhledem ke směru vláken a směr s číslicí 3 je kolmý na předchozí dva zmíněné směry. [30] Tento systém značení, znázorněný na obr. 3.11 [31] je používán také v předložené práci.

Tabulka 2: Typy symetrie kompozitů, převzato z [30]

Typ materiálu	Elastické konstanty	Orientace vzorku		Elastická konstanta zjištěná pomocí IEM
Izotropní	$E \quad G \quad \nu$	-		$E \quad G \quad \nu$
Transverzálně izotropní	$E_1 \quad E_2 = E_3$ $G_{12} = G_{13} \quad G_{23}$ $\nu_{12} = \nu_{13} \quad \nu_{23}$	1		$E_1 \quad G_{12} = G_{13}$
		2/3		$E_2 \quad G_{\text{eff}} = (G_{12} \quad G_{23})$
Ortotropní	$E_1 \quad E_2 \quad E_3$ $G_{12} \quad G_{13} \quad G_{23}$ $\nu_{12} \quad \nu_{21}$ $\nu_{13} \quad \nu_{31}$ $\nu_{23} \quad \nu_{32}$	1		$E_1 \quad G_{\text{eff}} = (G_{12} \quad G_{13})$
		2		$E_2 \quad G_{\text{eff}} = (G_{12} \quad G_{23})$
		3		$E_3 \quad G_{\text{eff}} = (G_{13} \quad G_{23})$



Obrázek 3.11 – Značení směrů v kompozitu, převzato z [31]

## Směšovací pravidlo

Základem modelů pro výpočet elastických charakteristik kompozitů je směšovací pravidlo. Směšovací pravidlo vychází z Hookova zákona a bylo odvozeno za předpokladu, že obě složky kompozitního materiálu (matrice i výztuž) vykazují lineární elastické chování. Zmíněné pravidlo bylo odvozeno pro ideální kompozit bez defektů (např. dutin okolo vláken), což snižuje přesnost předpovědi výsledných vlastností kompozitu, právě díky přítomným defektům. Kromě výpočtu celkového modulu pružnosti v tahu lze směšovací rovnici použít také např. k určení výsledné hustoty, Poissonova poměru nebo napětí v kompozitu. Existují dvě varianty směšovacího pravidla, lišící se podle způsobu zatěžování. V případě první varianty, reprezentované rovnicí



$$E_1 = E_f V_f + E_m V_m \quad (3.5)$$

je uvažováno zatěžování v podélném směru, zatímco rovnice

$$E_2 = \left( \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} \right)^{-1} \quad (3.6)$$

popisuje situaci při zatěžování ve směru příčném vzhledem ke směru vláken v kompozitu. V rovnici (3.5) a rov. (3.6) je  $E_1$  a  $E_2$  modul pružnosti v tahu kompozitu v podélném a příčném směru vzhledem ke směru vláken,  $E_f$ , resp.  $E_m$  je modul pružnosti vláken, resp. matrice a  $V_f$ , resp.  $V_m$  je objemový podíl vláken, resp. matrice. [28] [31]

V případě, že se jedná o dvousložkový kompozit (a není uvažována přítomnost dutin), lze objemový podíl matrice  $V_m$  vyjádřit pomocí objemového podílu vláken  $V_f$  podle rovnice

$$V_m = 1 - V_f. \quad (3.7)$$

Objemový podíl vláken  $V_f$  je definován rovnicí

$$V_f = \frac{v_f}{v_c}, \quad (3.8)$$

zatímco rovnice

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (3.9)$$

udává definici objemového podílu matrice  $V_m$ . V rovnici (3.8)  $v_f$ , respektive  $v_c$  je celkový objem vláken (výztuže), resp. celkový objem kompozitu, zatímco v rovnici (3.9)  $v_m$  udává celkový objem matrice v kompozitu. Směšovací pravidlo lze použít pro určování výsledného modulu pružnosti u vláknových (kontinuálních i diskontinuálních) a částicových kompozitů. [28] [29]

### Halpin-Tsai model

Další model používaný pro výpočet výsledného Youngova modulu kompozitů je model odvozený autory Halpin a Tsai [32]. Tento model reprezentovaný rovnicí

$$E_2 = \frac{(1 + \xi \eta V_f) E_m}{1 - \eta V_f}, \quad (3.10)$$

je používán pro výpočet modulu pružnosti v tahu v příčném směru u kontinuálních vláknových kompozitů (v podélném směru se používá směšovací pravidlo). Rov. (3.10) obsahuje parametr  $\xi$ , který udává míru vyztužení kompozitu vlákny. Pro vlákna s kruhovým nebo čtvercovým průřezem je doporučováno uvádět místo parametru  $\xi$  konstantu 2, pro obdélníkový průřez vláken je třeba  $\xi$  dopočítat z rozměrů vláken. Případně je možné tento parametr nahradit

rovnice vycházejícími z experimentálních dat. Druhý parametr  $\eta$ , který v rovnici (3.10) vystupuje je definován pomocí rovnice

$$\eta = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \xi} \quad (3.11)$$

Po mírných úpravách lze ale také tento model použít pro diskontinuální vláknové kompozity s preferovanou orientací. Výpočetní vztah pro modul pružnosti v tahu kompozitu s diskontinuálními vlákny v podélném směru  $E_{1D}$  udává rovnice

$$E_{1D} = \frac{\left(1 + \frac{2l}{d} \eta_L V_f\right) E_m}{1 - \eta_L V_f}, \quad (3.12)$$

ve které  $l$  udává délku vlákna kompozitu,  $d$  průměr vlákna kompozitu a parametr pro podélný směr  $\eta_L$  je definován rovnicí

$$\eta_L = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + \frac{2l}{d}} \quad (3.13)$$

Modul pružnosti v tahu kompozitu s diskontinuálními vlákny v příčném směru  $E_{2D}$  definuje rovnice

$$E_{2D} = \frac{(1 + 2\eta_T V_f) E_m}{1 - \eta_T V_f}, \quad (3.14)$$

ve které je parametr pro příčný směr  $\eta_T$  vyjádřen ve formě rovnice

$$\eta_T = \frac{\frac{E_f}{E_m} - 1}{\frac{E_f}{E_m} + 2} \quad (3.15)$$

V případě kompozitu s diskontinuálními vlákny s náhodnou orientací je možno pro určení modulu pružnosti použít empiricky získanou rovnici

$$E = \frac{3}{8} E_{1D} + \frac{5}{8} E_{2D}, \quad (3.16)$$

kdy se předpokládá izotropní chování kompozitu. Do uvedeného vztahu je možno buď dosadit hodnoty Youngova modulu získané z experimentu nebo dosadit rovnice (3.12) a (3.14) používané pro diskontinuální kompozity. [28] [31]

### 3.3.2 Výpočetní modely používané pro určování Youngova modulu pomocí IEM

Kromě modelů elasticity kompozitů je v předložené práci pro určování Youngova modulu pružnosti v tahu ověřována i možnost použití modelů, založených na měření modulu pružnosti prostřednictvím rezonanční frekvence.

Tyto teorie, které vznikly na základě Euler-Bernoulliho teorie pro ohyb nosníku, dávají do souvislosti rezonanční frekvenci, a rozměrové a materiálové charakteristiky ohýbaného tělesa. Rovnice

$$f_n = \frac{X_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{EI}{\rho S}} \quad (3.17)$$

vycházející z Euler-Bernoulliho teorie, platná pro homogenní materiál byla v práci [33] doplněna o korekční faktory a následně převzata ve tvaru uvedeném v rov. (3.1) do normy ASTM-E1876. V rov. (3.17) je  $f_n$  rezonanční frekvence v ohybu pro  $n$ -tý vibrační mód,  $X_n$  konstanta, vyjadřující okrajové podmínky ohýbaného tělesa,  $L$  délka tělesa,  $E$  Youngův modul pružnosti,  $I$  kvadratický moment průřezu,  $\rho$  hustota a  $S$  plocha. [34]

Dále uváděné výpočetní modely jsou založeny na teorii ohybové tuhosti kompozitního nosníku. Je uvažován kompozitní nosník s obdélníkovým průřezem a volnými konci (resp. s volnými okrajovými podmínkami), zatěžovaný v ohybu. U těchto modelů se předpokládá, že povlak je perfektně homogenní, kompaktní a přilnavý k substrátu. Při ohybu kompozitu tvořeného dvojicí substrát a povlak dochází k vytváření ohybového momentu, odpor kladený materiálem vůči tomuto ohybu je nazýván ohybová tuhost. Ohybovou tuhost kompozitu (v tomto případě dvojice substrát-povlak) vyjádřenou jako součin modulu pružnosti v tahu  $E$  a kvadratického momentu pro příslušný průřez  $I$ , je možno získat jako součet ohybové tuhosti substrátu a ohybové tuhosti povlaku, jak znázorňuje rovnice

$$E_t I_t = E_s I_s + E_c I_c. \quad (3.18)$$

Podobný předpoklad lze uvést pro hustotu  $\rho$  a plochu kompozitu  $S$

$$\rho_t S_t = \rho_s S_s + \rho_c S_c. \quad (3.19)$$

Značení veličin je následující – pro kompozit (dvojici substrát-povlak) jsou veličiny značené indexem  $t$ , pro substrát indexem  $s$  a povlak je označen indexem  $c$ . Tyto rovnice byly následně dosazeny do rovnice (3.17), z čehož vznikla upravená rovnice

$$f_n = \frac{X_n^2}{L^2} \sqrt{\frac{E_t I_t}{\rho_t S_t}}, \quad (3.20)$$

která dává do souvislosti rezonanční frekvenci, rozměrové a materiálové charakteristiky kompozitního nosníku. Na základě úprav a dosazení do rovnice (3.20) byly odvozeny dále uváděné modely. [34]

### Lopezův model

Tento model je platný pro kompozitní materiál s obdélníkovým průřezem. Lopezův model je reprezentován rovnicí

$$(R_f)^2 = \frac{1 + R_E(3R_h + 6R_h^2 + 4R_h^3)}{1 + R_h R_\rho} \quad (3.21)$$

a uvažuje pouze jeden druh povlaku naneseného na substrát. Rovnice Lopezova modelu obsahuje poměry různých měřených veličin, které jsou vyjádřeny následujícími rovnicemi. Rovnice

$$R_f = \frac{f_t}{f_s}, \quad (3.22)$$

kde  $R_f$  je označení pro poměr rezonanční frekvence substrátu s povlakem  $f_t$  ku rezonanční frekvenci substrátu samotného  $f_s$ . Dále rovnice

$$R_E = \frac{E_c}{E_s} \quad (3.23)$$

definující  $R_E$ , tedy poměr Youngova modulu povlaku  $E_c$  ku Youngovu modulu substrátu  $E_s$ . Poměr tloušťky povlaku  $h_c$  ku tloušťce substrátu  $h_s$  označený  $R_h$  je definován rovnicí

$$R_h = \frac{h_c}{h_s}. \quad (3.24)$$

Rovnice

$$R_\rho = \frac{\rho_c}{\rho_s} \quad (3.25)$$

dává do souvislosti poměr hustoty povlaku  $\rho_c$  ku hustotě substrátu  $\rho_s$  označený  $R_\rho$ . Nevýhodou tohoto modelu je, že neuvažuje posun neutrální osy vzorku po nanesení povlaku, což při vyšších tloušťkách povlaku způsobuje nárůst nepřesnosti výpočtu. [34]

Pomocí dosazení jednotlivých poměrů do rovnice (3.21) a následného vyjádření hledaného parametru  $E_c$  (Youngův modul pružnosti v tahu povlaku) lze získat rovnici

$$E_c = \frac{E_s}{3R_h + 6R_h^2 + 4R_h^3} \left[ \left[ (R_f)^2 (1 + R_h R_\rho) \right] - 1 \right], \quad (3.26)$$

která umožňuje výpočet  $E_c$ . Zde uvedené poměry ve formě rovnic (3.22) až (3.25) jsou platné i pro další uvedené modely. [34]

### Pautrotův model

Pautrotův model reprezentovaný rovnicí

$$(R_f)^2 = \frac{1 + R_h^3 R_E + \frac{3R_h R_E (1 + R_h)^2}{1 + R_h R_E}}{1 + R_h R_E} \quad (3.27)$$

odstraňuje nevýhodu Lopezova modelu a uvažuje posun neutrální osy po nanesení povlaku, což umožňuje jeho použití i pro povlaky větších tlouštěk. Tento model v uvedené podobě je používán pro substrát s jedním druhem povlaku, ale v případě potřeby je možné model rozšířit na vícevrstvý model, kdy je uvažován více než jen jeden druh naneseného povlaku. Z rovnice (3.27) lze po dosazení výše zmíněných poměrů a následném vyjádření hledaného parametru  $E_c$ , získat rovnici

$$E_c = \frac{E_s}{2R_h^4} \left[ (R_h + R_\rho R_h^2)(R_f)^2 - 4R_h^3 - 6R_h^2 - 4R_h \right. \\ \left. + \left( 4R_h^4 \left[ (1 + R_h R_\rho)(R_f)^2 - 1 \right] \right. \right. \\ \left. \left. + \left[ 4R_h^3 + 6R_h^2 + 4R_h - (R_h + R_\rho R_h^2)(R_f)^2 \right]^2 \right)^{0,5} \right] \quad (3.28)$$

pro výpočet  $E_c$ . Při porovnávání zmíněných modelů v literatuře s modelem vytvořeným pomocí metody konečných prvků (MKP) vykazoval Pautrotův model nejlepší shodu s modelem vytvořeným pomocí MKP, tudíž by se mělo jednat o nejpřesnější z uváděných modelů. [34] [35]

### Berryho model

Berryho model reprezentovaný rovnicí

$$(R_f)^2 = 1 + R_h[3R_E - R_\rho] \quad (3.29)$$

využívá zjednodušených principů z Lopezova modelu. Tudíž stejně jako Lopezův model neuvažuje posun neutrální osy v důsledku nanesení povlaku na substrát. Zároveň stejně jako Lopezův model je aplikovatelný pouze pro vzorky s jedním druhem povlaku. Pomocí stejného principu jako u předchozích dvou modelů lze po dosazení příslušných poměrů získat rovnici

$$E_c = \frac{E_s}{3} \left[ R_\rho + \frac{(R_f)^2 - 1}{R_h} \right] \quad (3.30)$$

pro výpočet  $E_c$ . [34]

### Whitingův model

Whitingův model reprezentovaný rovnicí

$$E_c = \frac{E_s}{3} \left[ \frac{2R_f + R_h R_\rho - 2}{R_h} \right] \quad (3.31)$$

je zjednodušenou verzí Pautrotova modelu a je používán převážně pro určování Youngova modulu tenkých povlaků [36]. Tento model v uvedené formě je použitelný pouze pro vzorky s jedním druhem naneseného povlaku. [35]

Mimo uvedené modely založené na teorii ohýbaného kompozitního nosníku existují také modely postavené na klasické teorii laminovaného nosníku („classical laminated beam theory“). Modely založené na této teorii lze také využít pro určování modulu pružnosti povlaků,

ale využívají se převážně u substrátů s povlaky na obou jeho stranách a v případech, kdy se jedná o více druhů tenčích povlaků, protože při vyšší tloušťce povlaků dochází u modelů založených na této teorii k nárůstu nepřesnosti. Jako hranice použitelnosti pro modely založené na této teorii je uváděna tloušťka povlaku nižší než 250 nm, což je řádový rozdíl oproti tloušťkám povlaku používaných v experimentální části, proto tyto modely nebudou dále detailněji rozebírány. [35]

## 4 Experimentální část

V experimentální části práce je řešeno měření základní rezonanční frekvence pomocí impulzní excitační metody, za účelem určení modulu pružnosti v tahu povlaků nanesených pomocí technologie Cold Spray.

### 4.1 Výroba a příprava experimentálního materiálu

#### 4.1.1 Použité materiály

Jako materiál substrátu byla vybrána tvářená hliníková slitina EN AW-5083 H111 tloušťky 8 mm, jako materiál povlaku byla zvolena čistá měď ve formě prášku. Tato kombinace materiálů byla zvolena zejména z důvodu dobré přilnavosti měděného povlaku na hliníkovém substrátu, a tedy minimálnímu riziku dekoheze povlaku při dalším zpracování experimentálního materiálu.

Slitina EN AW-5083 H111 (také značená AlMg4,5Mn0,7) patří mezi tvářené slitiny. Jedná se o tepelně nevytvrditelnou slitinu hliníku legovanou hořčíkem a manganem. Dodatečné označení H111 udává, že slitina byla žíhána a mírně deformačně zpevněna. Tato slitina vyniká dobrou svařitelností a výbornou korozní odolností v běžné i mořské vodě. Zároveň se ale jedná o materiál náchylný na vznik mezikrystalické koroze při dlouhodobém používání při teplotách převyšujících 65 °C. Tato slitina se používá na výrobu tlakových nebo úložných nádob v potravinářském a chemickém průmyslu, případně je možné ji využít také v lodním a automobilovém průmyslu. [37] [38] [39]

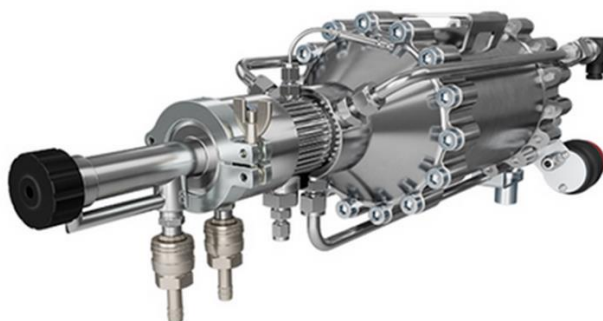
Povlak na povrchu substrátu byl vytvořen z měděného prášku (zrnitost  $15 \div 45 \mu\text{m}$ ), jehož producentem je firma Safina a.s. Prášek ve formě kulovitých částic vykazující vysokou chemickou čistotu (více než 99,95 % Cu) byl vyroben pomocí plynové atomizace a je určený pro Cold Spray aplikace. Jeho depoziční účinnost v případě Cold Spray nástřiku by měla být až 99 %. [40]

#### 4.1.2 Cold Spray

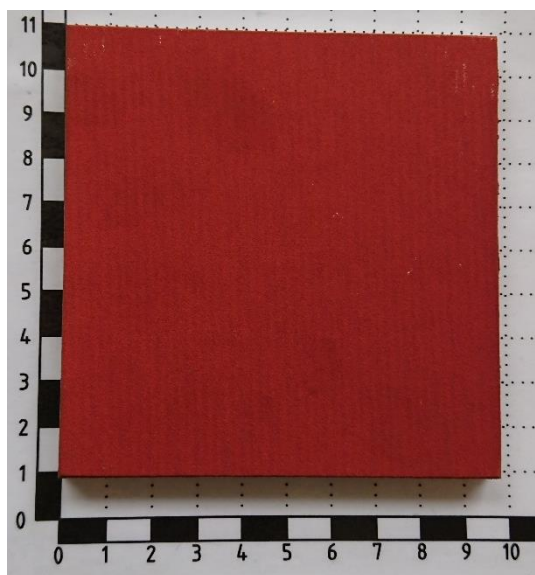
Prášková měď byla nanesena na substrát pomocí technologie Cold Spray. Použito bylo zařízení Impact Innovations Cold Spray system 5/11 (viz obr. 4.1 [41]). Nanášení probíhalo při teplotě 450 °C a tlaku 3 MPa (30 barů), rychlost posuvu při nanášení byla 200 mm/s s rozestupem jednotlivých řádků 1 mm. Celkem bylo naneseno 5 různých tlouštěk povlaku na substrát, a to od tloušťky povlaku přibližně 400  $\mu\text{m}$  po tloušťku cca 2000  $\mu\text{m}$ . Výsledkem přípravy povlaků tedy bylo pět desek s různými tloušťkami měděného povlaku a jedna deska čistého substrátu bez nástřiku. Příklad desky s naneseným povlakem je uveden na obr. 4.2. Označení desek spolu s příslušnými tloušťkami povlaku je obsahem v tabulky 3.

Tabulka 3: Označení polotovarů (desek)

Označení desky	A	B	C	D	E	F
Přibližná tloušťka povlaku [ $\mu\text{m}$ ]	0	400	800	1200	1600	2000



Obrázek 4.1 – Zařízení Impact Innovations Cold Spray system 5/11 [41]

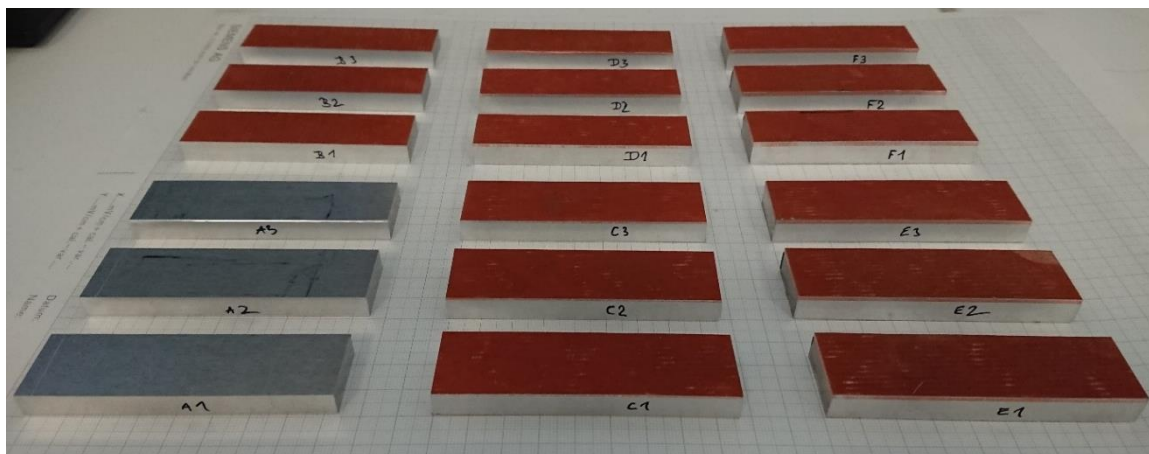


Obrázek 4.2 – Substrát s povlakem po dokončení nástřiku pomocí technologie CS

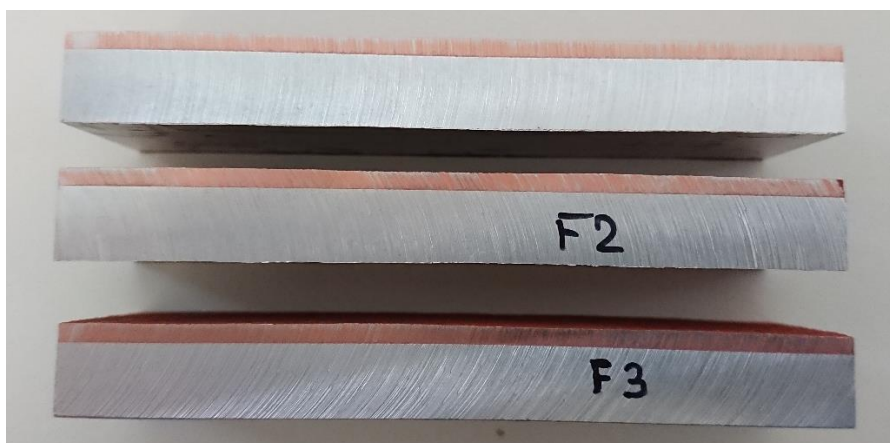
#### 4.1.3 Příprava zkušebních těles

Každá z šesti desek (A ÷ F) s různými tloušťkami povlaků a s rozměry přibližně 96×96 mm byla rozřezána na metalografické pile Leco MSX 250 na tři vzorky přibližných rozměrů 85×25 mm. Geometricky přesných zkušebních těles (kvádrů) bylo finálně dosaženo frézováním, viz obr. 4.3 a obr. 4.4.





Obrázek 4.3 – Zkušební tělesa



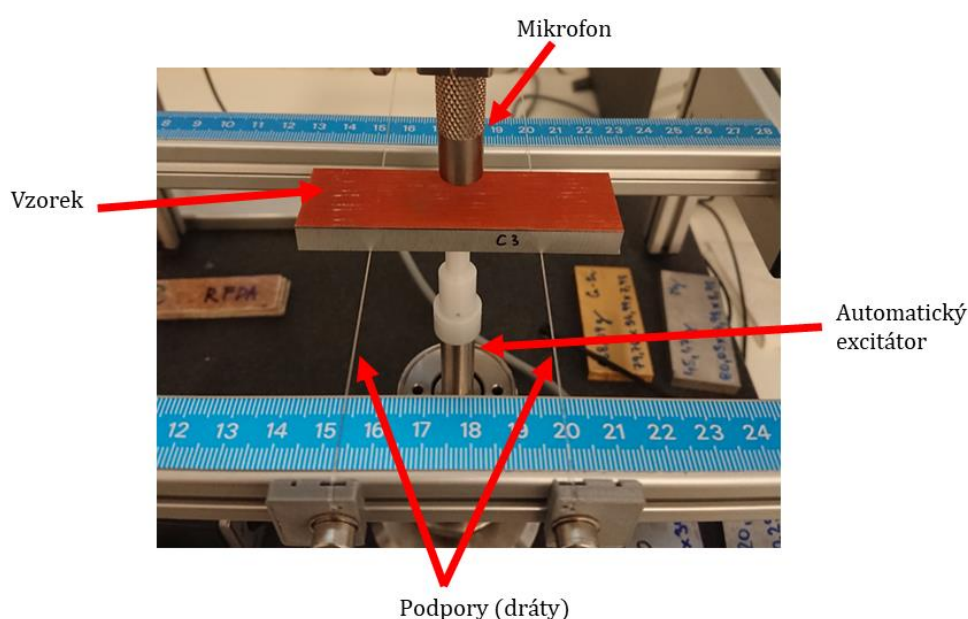
Obrázek 4.4 – Zkušební tělesa řady F, boční pohled

## 4.2 Impulzní excitační metoda, experimentální postup

Před určováním modulu pružnosti v tahu bylo nutné změřit jednotlivé rozměry zkušebních těles, určit jejich hmotnost a tloušťky nanesených vrstev povlaku. U každého ze vzorků (A1 ÷ F3) byla pomocí digitálního posuvného měřítka změřena délka na 3 místech, šířka také na 3 místech a tloušťka vzorku na 18 místech a tyto získané hodnoty byly zprůměrovány. Dále byl každý vzorek zvážen na digitální váze Kern 572 s přesností na 0,01 g. Pomocí mikroskopu Olympus SZX10 byla změřena tloušťka naneseného povlaku na 10 místech na každém zkušebním tělese a tyto hodnoty byly pro účely výpočtů opět zprůměrovány.

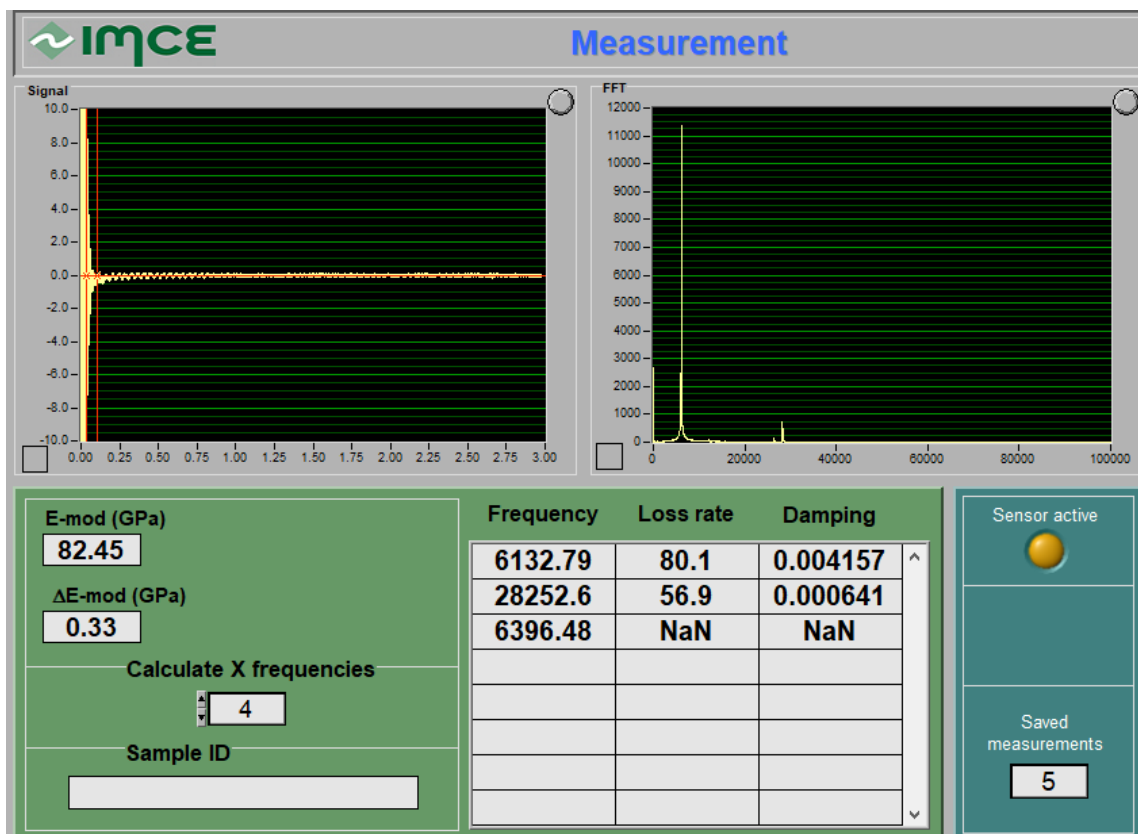
Pro měření rezonanční frekvence a určení Youngova modulu pružnosti v tahu byla použita sestava, skládající se z měřicího stolku s podporami ve formě drátů, mikrofону, automatického excitátoru pro vyvolání impulzu a zařízení na zpracování signálu, propojené se stolním počítačem (IMCE, RFDA system 24). Alternativně lze místo automatického excitátoru pro vyvolání impulzu použít kladívko. Použitím automatického excitátoru je ale dosaženo lepší reprodukovatelnosti aplikované síly, jelikož kulička (popř. váleček) narážejí do vzorku vždy stejnou silou, zatímco u kladívka síla úderu závisí na zručnosti operátora. [22]

Vzorek byl položen na dráty v pozicích určených softwarem podle normy ASTM E-1876 [3], tedy ve vzdálenosti  $0,224 \times L$  od jeho konce. Automatický excitátor byl umístěn ze spodní strany vzorku tak, aby úder směřoval do jeho středu, zatímco mikrofon se nacházel v poloze nad středem vzorku, jak je zřejmé z obr. 4.5. Měření bylo provedeno v ohybovém vibračním módu. Vzorek byl umístěn tak, aby úder směřoval ze strany substrátu, nikoliv ze strany povlaku. V rámci předběžného měření byl otestován také postup, kdy byl vzorek otočen a došlo k úderu do povlaku, ale výsledné hodnoty rezonančních frekvencí a modulů pružnosti se významně nelišily od údajů získaných při úderu do substrátu. Z tohoto důvodu bylo jako preferované místo úderu vybrán substrát, aby se předešlo případnému poškození povlaku po opakovaných úderech do něj.



Obrázek 4.5 – Sestava pro měření pomocí IEM

Vzorek byl umístěn do zvolené pozice (viz obr. 4.5) a do softwaru byly zadány dříve zjištěné parametry zkušebních těles (konkrétně jejich rozměry a hmotnost). Měření a výpočet modulu pružnosti v tahu byly provedeny pro ohybový vibrační mód a zkušební tělesa tvaru kvádru. Tvar křivky signálu po excitaci vzorku je patrný z obr. 4.6. V levé horní části obrázku se jedná o graf závislosti amplitudy vibrací na čase, v pravé horní části potom o závislost amplitudy na rezonanční frekvenci zjištěné pomocí Fourierovy transformace, kde vrcholy na křivce značí jednotlivé zjištěné rezonanční frekvence. Výsledkem jednoho cyklu měření byla rezonanční frekvence, koeficient útlumu (vnitřního tření) a Youngův modul pružnosti v tahu daného zkušební tělesa (tj. dvojice substrát-povlak). Pro každý vzorek bylo opakováno měření pomocí IEM desetkrát a výsledné hodnoty veličin byly zprůměrovány.



Obrázek 4.6 – Softwarové rozhraní pro výstup z měření pomocí IEM

## 5 Výsledky

### 5.1 Zkouška tahem

Podle normy ČSN EN 485-2+A1 [42] by slitina EN AW-5083 H111 měla mít pro zvolenou tloušťku (8 mm) smluvní mez kluzu  $R_{p0,2}$  minimálně 115 MPa, mez pevnosti  $R_m$  minimálně 270 MPa a tažnost alespoň 16 %. Skutečné mechanické vlastnosti materiálu substrátu včetně modulu pružnosti v tahu byly určeny zkouškou tahem dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [43] dvou zkušebních těles (označených S1 a S2) na stroji Zwick/Roell Z250. Tvar zkušebních těles odpovídal normě DIN 50125 – E  $8 \times 25 \times 80$  [44]. Záznamy ze zkoušky tahem jsou uvedeny v Příloze A. Zkouška byla provedena primárně pro určení modulu pružnosti v tahu substrátu ( $E_s$ ), který je nezbytný pro výpočet modulu pružnosti v tahu povlaku pomocí kompozitních modelů. Zjištěné hodnoty materiálových charakteristik jsou uvedeny v tab. 4.

Tabulka 4: Materiálové charakteristiky substrátu

Č. vzorku	$E$ [GPa]	$R_{p0,2}$ [MPa]	$R_m$ [MPa]	$A_g$ [%]	$A$ [%]
S1	72,70	163	317	19,4	21,0
S2	73,36	164	318	17,3	20,8
Průměr	73,03	163,5	317,5	18,4	20,9

Podle dat uvedených v tabulce 4 je zřejmé, že substrát splňuje nároky definované normou ČSN EN 485-2+A1 [42] a hodnoty  $R_{p0,2}$ ,  $R_m$  a  $A$  jsou ve všech případech vyšší než minimální požadované hodnoty těchto charakteristik. Pro další výpočty byla použita průměrná hodnota modulu pružnosti v tahu z obou měření,  $E_s = 73,03$  GPa.

### 5.2 Parametry vzorků A1 ÷ F3

Pro určení modulu pružnosti v tahu pomocí impulzní excitační metody je potřeba přesně změřit rozměry a hmotnost zkušebních těles. Naměřené parametry vzorků A1 ÷ F3 zahrnující jejich délku, šířku, celkovou tloušťku a hmotnost jsou uvedeny v tabulce 5.

Obsahem tab. 6 jsou hodnoty tloušťek povlaku  $h_c$  a tloušťek substrátu  $h_s$  jednotlivých vzorků. Je patrné, že rozdíly mezi tloušťkami povlaků stejných skupin vzorků (tj. vzorků označených stejným písmenem) jsou minimální.

Tabulka 5: Rozměry a hmotnost zkušebních těles

Č. vzorku	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Délka $L$ [mm]	85,46	85,59	85,80	85,33	85,37	85,30	86,17	86,55	86,29
Šířka $b$ [mm]	23,94	23,98	24,03	23,17	23,25	23,25	24,88	24,78	24,80
Celk. tl. $t$ [mm]	8,01	8,01	8,03	8,50	8,47	8,51	8,89	8,93	8,90
Hmotnost $m$ [g]	43,55	43,71	43,83	49,00	49,08	49,14	60,74	60,80	60,31
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
Délka $L$ [mm]	85,68	85,65	85,65	86,18	86,25	86,25	85,97	85,98	85,91
Šířka $b$ [mm]	22,64	22,68	22,64	24,29	24,28	24,39	23,75	23,75	23,83
Celk. tl. $t$ [mm]	9,36	9,29	9,34	9,73	9,78	9,73	10,26	10,23	10,17
Hmotnost $m$ [g]	61,92	61,87	61,71	74,25	74,25	74,40	79,92	79,79	79,78

Tabulka 6: Tloušťky vrstev povlaku a substrátu zkušebních těles

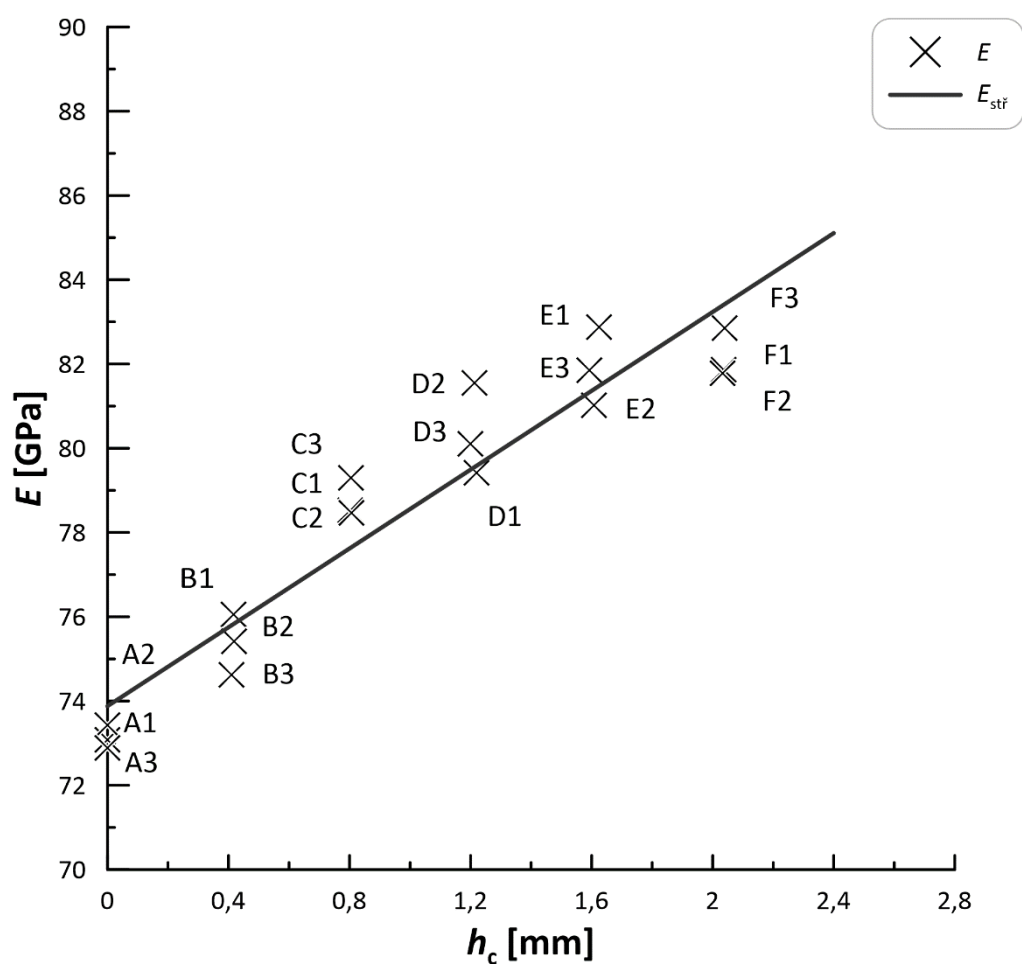
Č. vzorku	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Tl. povlak $h_c$ [mm]	0	0	0	0,42	0,42	0,41	0,80	0,81	0,81
Tl. substrát $h_s$ [mm]	8,01	8,01	8,03	8,08	8,05	8,10	8,09	8,12	8,10
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
Tl. povlak $h_c$ [mm]	1,22	1,21	1,20	1,63	1,61	1,59	2,04	2,03	2,04
Tl. substrát $h_s$ [mm]	8,14	8,08	8,14	8,11	8,18	8,13	8,22	8,20	8,13

### 5.3 Data z impulzní excitační metody

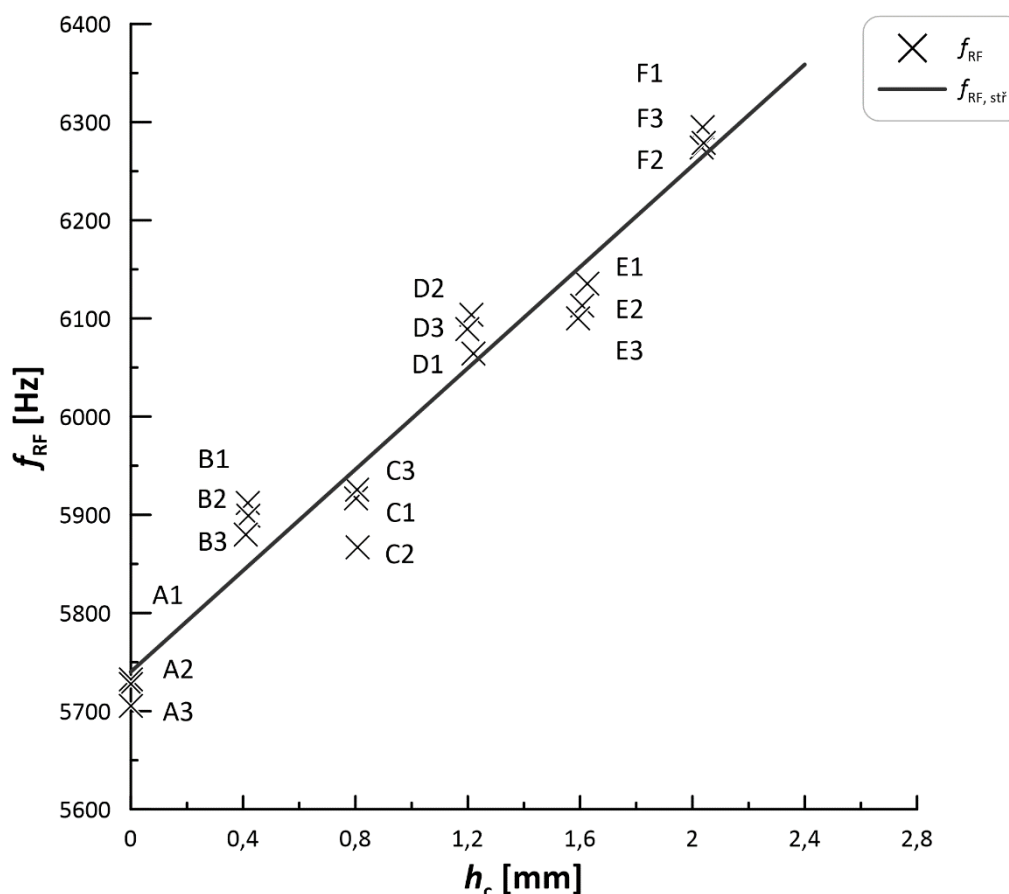
Hodnoty modulů pružnosti ( $E$ ), rezonančních frekvencí ( $f_{\text{RF}}$ ) a vnitřního tření ( $Q^{-1}$ ) jednotlivých vzorků jsou uvedeny v tabulce 7. Hodnoty Youngova modulu naměřeného pomocí IEM ( $E$ ) v závislosti na tloušťce povlaku ( $h_c$ ) jsou uvedeny v grafu na obr. 5.1 a proloženy lineární závislostí  $E = 4,68 h_c + 73,88$  [GPa]. Závislost rezonanční frekvence ( $f_{\text{RF}}$ ) na tloušťce povlaku ( $h_c$ ) je uvedena v grafu na obr. 5.2, hodnoty rezonanční frekvence jsou proloženy lineární závislostí s rovnicí  $f_{\text{RF}} = 257,72 h_c + 5740,06$  [Hz].

Tabulka 7: Rezonanční frekvence  $f_{\text{RF}}$ , tlumení  $Q^{-1}$  a moduly pružnosti v tahu  $E$  zkušebních těles

Č. vzorku	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
$E$ [GPa]	73,08	73,42	72,89	76,05	75,42	74,62	78,53	78,47	79,29
$f_{\text{RF}}$ [Hz]	5732,1	5727,6	5705,4	5911,9	5898,8	5879,8	5916,6	5866,9	5925,7
$Q^{-1}$ [-]	0,0024	0,0046	0,0023	0,0053	0,0053	0,0044	0,0056	0,0055	0,0054
Č. vzorku	D1	D2	D3	E1	E2	E3	F1	F2	F3
$E$ [GPa]	79,42	81,56	80,11	82,87	81,02	81,85	81,86	81,78	82,85
$f_{\text{RF}}$ [Hz]	6064,4	6103,5	6089,1	6135,5	6112,9	6100,3	6294,9	6274,2	6278,6
$Q^{-1}$ [-]	0,0042	0,0049	0,0050	0,0039	0,0046	0,0040	0,0033	0,0029	0,0033



Obrázek 5.1 – Graf závislosti Youngova modulu pružnosti v tahu na tloušťce povlaku



Obrázek 5.2 – Graf závislosti rezonanční frekvence na tloušťce povlaku

## 5.4 Výpočet modulu pružnosti v tahu povlaku

Hodnoty modulů pružnosti a základních rezonančních frekvencí naměřených na jednotlivých vzorcích lze považovat za hodnoty platné pro celý daný vzorek/kompozit, tzn. systém substrát-povlak. Hodnota modulu pružnosti v tahu samotného substrátu  $E_s$  byla zjištěna zkouškou tahem. Hodnoty modulu pružnosti kompozitu a modulu pružnosti substrátu byly použity při následných výpočtech, jejichž cílem bylo určení modulu pružnosti v tahu měděného povlaku  $E_c$  pomocí následujících pěti modelů – směšovacího pravidla, Lopezova modelu, Pautrotova modelu, Berryho modelu a modelu Whitingova. Směšovací pravidlo bylo vybráno proto, že tvoří základ elastických modelů kompozitních materiálů a většina dalších modelů z něj vychází. Ostatní výše uvedené modely pak byly vybrány z toho důvodu, že jsou často používány pro určování modulu pružnosti v tahu povlaků, ovšem ve srovnání s povlaky uvedenými v této práci s řádově menšími tloušťkami. Jedním z cílů předložené práce je proto ověření, zda lze tyto modely použít také pro povlaky větších tlouštěk.

### 5.4.1 Směšovací pravidlo

Rovnice (3.5), platná pro směšovací pravidlo v podélném směru obsahuje členy  $E_1$ ,  $E_m$ ,  $E_f$ ,  $V_m$  a  $V_f$ . Objemový podíl matrice  $V_m$  lze vyjádřit pomocí rov. (3.7). Modul pružnosti

kompozitu  $E_1$  byl získán z impulzní excitační metody, modul pružnosti matrice  $E_m$  (v tomto případě se jedná o modul pružnosti substrátu  $E_s$ ) byl určen zkouškou tahem. Modul pružnosti výztuže  $E_f$ , tzn. modul pružnosti naneseného povlaku  $E_c$ , je hledaným parametrem. Objemový podíl výztuže  $V_f$  lze získat úpravou rov. (3.8) na tvar

$$V_f = \frac{h_c}{t}, \quad (4.1)$$

kde  $h_c$  odpovídá tloušťce naneseného povlaku a  $t$  celkové tloušťce zkušebního tělesa (tj. tloušťce substrátu s povlakem).

Výsledný vztah pro výpočet modulu pružnosti v tahu povlaku lze potom psát ve tvaru

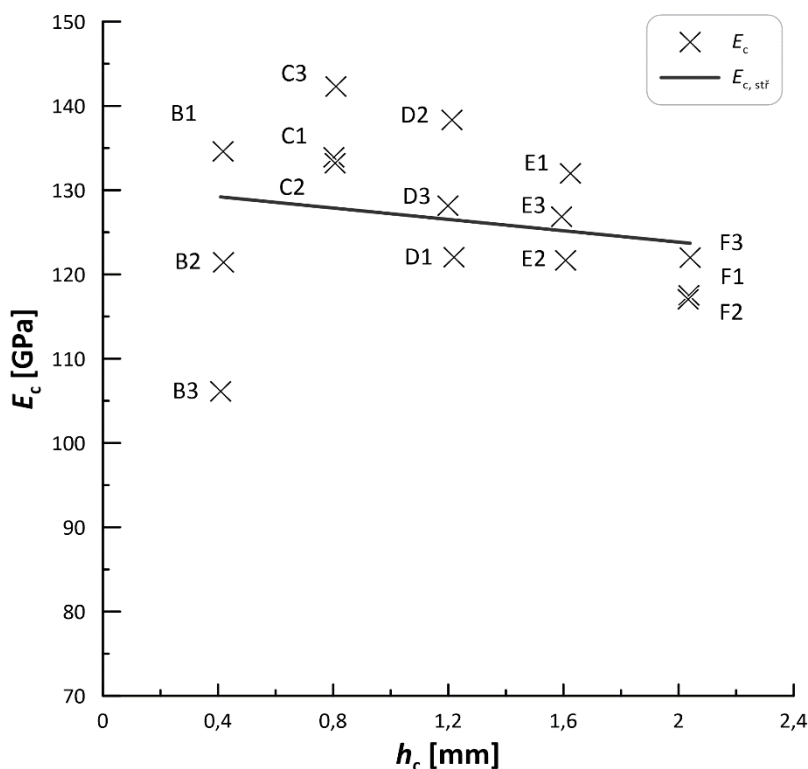
$$E_c = \frac{E - E_s(1 - V_f)}{V_f}. \quad (4.2)$$

Hodnoty modulů pružnosti v tahu  $E_c$ , určené podle rov. (4.2) jsou spolu s průměrnou hodnotou modulu pružnosti a směrodatnou odchylkou ( $E_{c, \text{stř}} \pm s$ ) pro jednotlivé série zkušebních těles uvedeny v tab. 8. Graficky je závislost modulu pružnosti  $E_c$  na tloušťce povlaku  $h_c$  uvedena na obr. 5.3. Metodou nejmenších čtverců byla experimentálními body proložena funkce ve tvaru  $E_c = -3,37 h_c + 130,57$  [GPa].

Tabulka 8: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí směšovacího pravidla

Čís. vzorku	B1	B2	B3
$E_c$ [GPa]	134,60	121,42	106,12
$E_{c, \text{stř}} \pm s$ [GPa]		120,71 $\pm$ 11,64	
Čís. vzorku	C1	C2	C3
$E_c$ [GPa]	133,88	133,20	142,29
$E_{c, \text{stř}} \pm s$ [GPa]		136,46 $\pm$ 4,13	
Čís. vzorku	D1	D2	D3
$E_c$ [GPa]	122,02	138,32	128,15
$E_{c, \text{stř}} \pm s$ [GPa]		129,50 $\pm$ 6,72	
Čís. vzorku	E1	E2	E3
$E_c$ [GPa]	131,98	121,68	126,87
$E_{c, \text{stř}} \pm s$ [GPa]		126,84 $\pm$ 4,2	
Čís. vzorku	F1	F2	F3
$E_c$ [GPa]	117,52	117,07	121,99
$E_{c, \text{stř}} \pm s$ [GPa]		118,86 $\pm$ 2,22	





Obrázek 5.3 – Závislost Youngova modulu pružnosti v tahu povlaku na tloušťce povlaku – směšovací pravidlo

### 5.4.2 Lopezův model

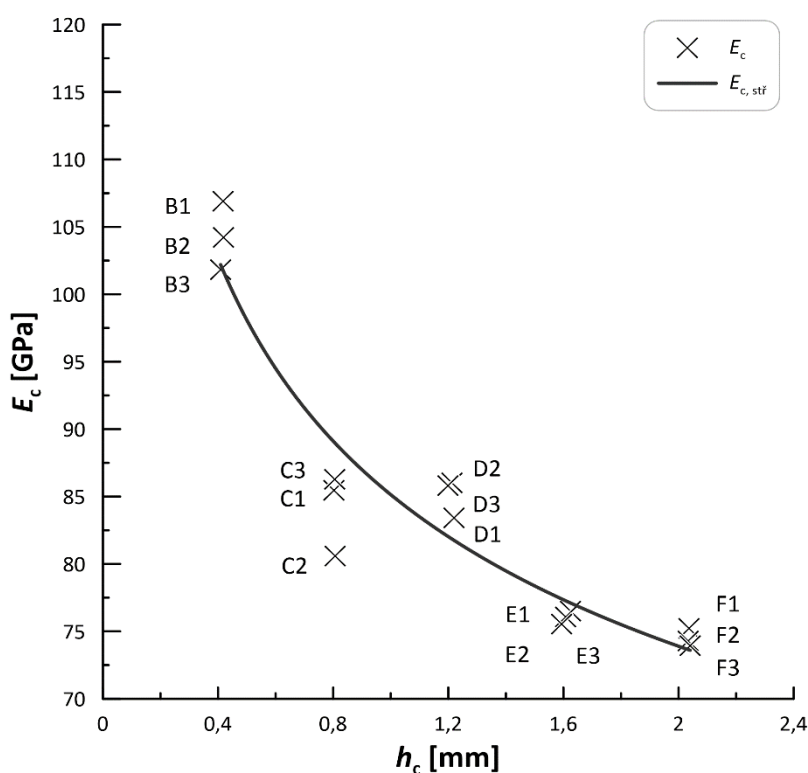
Pro všechna zkušební tělesa (A1 ÷ F3) byly podle rovnic (3.22) až (3.25), uvedených v teoretické části práce, spočítány jednotlivé poměry příslušných veličin. Tyto poměry je nutné určit pro potřebu Lopezova [34] i všech ostatních modelů. Za celkovou rezonanční frekvenci vzorku  $f_i$  byly dosazeny hodnoty  $f_{RF}$  získané pomocí IEM pro jednotlivé vzorky. Jako rezonanční frekvence substrátu byla použita průměrná hodnota rezonanční frekvence tří vzorků bez povlaku ( $f_s = 5721,73$  Hz). Hodnota modulu pružnosti v tahu substrátu  $E_s$  byla získána z tahové zkoušky. Hodnoty tloušťek substrátu  $h_s$  a tloušťek povlaku  $h_c$  jsou uvedeny v tab. 6.

V případě hustoty povlaku  $\rho_c$  se předpokládá, že měděný povlak vlivem oxidace a porozity typické pro Cold Spray technologii bude mít nižší hustotu, než je hustota čisté mědi ( $\rho_{Cu} = 8,96$  g/cm<sup>3</sup> [45]). Pro účely výpočtů byla použita hodnota zjištěná z literatury,  $\rho_c = 8,81$  g/cm<sup>3</sup>. [46] Za hustotu substrátu  $\rho_s$  byla dosazena hodnota  $\rho_s = 2,65$  g/cm<sup>3</sup> typická pro hliníkovou slitinu, která byla použita jako substrát. [37]

Tab. 9 obsahuje hodnoty modulů pružnosti  $E_c$  povlaku jednotlivých zkušebních těles, k jejichž výpočtu byla využita rov. (3.26). Regresní funkce závislosti modulu pružnosti  $E_c$  na tloušťce povlaku  $h_c$ , uvedená v grafu na obr. 5.4, má tvar mocninné funkce  $E_c = 85,14 h_c^{-0,204}$  [GPa].

Tabulka 9: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Lopezova modelu

Čís. vzorku	B1	B2	B3
$E_c$ [GPa]	106,89	104,21	101,82
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$104,30 \pm 2,07$	
Čís. vzorku	C1	C2	C3
$E_c$ [GPa]	85,45	80,59	86,28
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$84,11 \pm 2,51$	
Čís. vzorku	D1	D2	D3
$E_c$ [GPa]	83,42	86,02	85,80
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$85,08 \pm 1,18$	
Čís. vzorku	E1	E2	E3
$E_c$ [GPa]	76,51	76,08	75,54
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$76,04 \pm 0,40$	
Čís. vzorku	F1	F2	F3
$E_c$ [GPa]	75,23	74,28	73,94
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$74,48 \pm 0,55$	



Obrázek 5.4 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Lopezův model

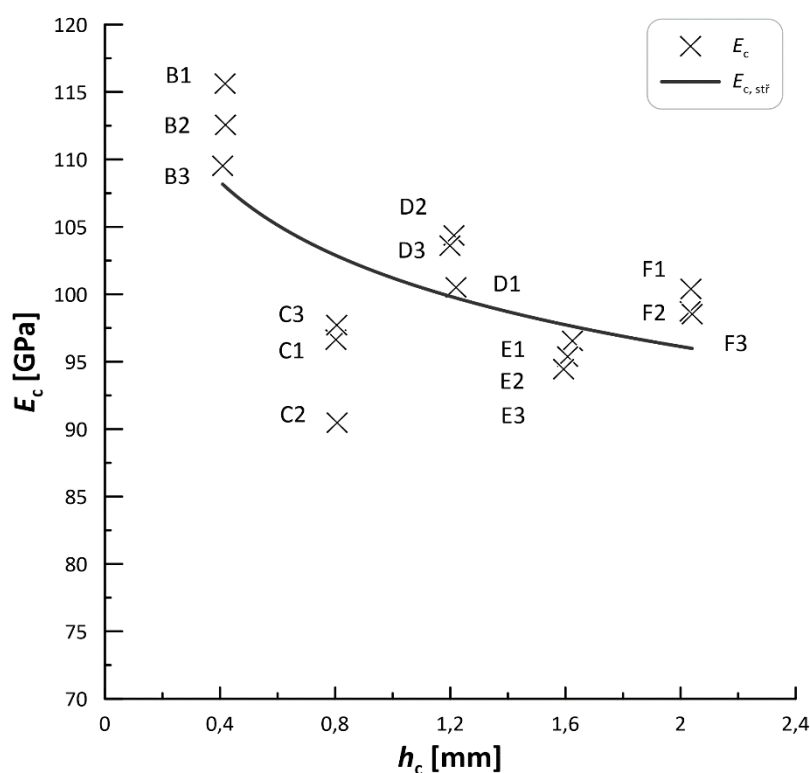
### 5.4.3 Pautrotův model

Hodnoty modulu pružnosti v tahu  $E_c$  jednotlivých zkušebních těles, vypočtených podle Pautrota modelu [34] [35], (viz rov. (3.28)), jsou uvedeny v tab. 10 a v grafické podobě

v závislosti na tloušťce povlaku  $h_c$  v grafu na obr. 5.5. Mocnná regresní funkce, proložená metodou nejmenších čtverců má v tomto případě tvar  $E_c = 101,21 h_c^{-0,074}$  [GPa].

Tabulka 10: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Pautrota modelu

Čís. vzorku	B1	B2	B3
$E_c$ [GPa]	115,61	112,55	109,53
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$112,56 \pm 2,48$	
Čís. vzorku	C1	C2	C3
$E_c$ [GPa]	96,63	90,49	97,72
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$94,95 \pm 3,18$	
Čís. vzorku	D1	D2	D3
$E_c$ [GPa]	100,52	104,36	103,62
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$102,83 \pm 1,66$	
Čís. vzorku	E1	E2	E3
$E_c$ [GPa]	96,54	95,38	94,46
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$95,46 \pm 0,85$	
Čís. vzorku	F1	F2	F3
$E_c$ [GPa]	100,40	98,74	98,53
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$99,22 \pm 0,83$	



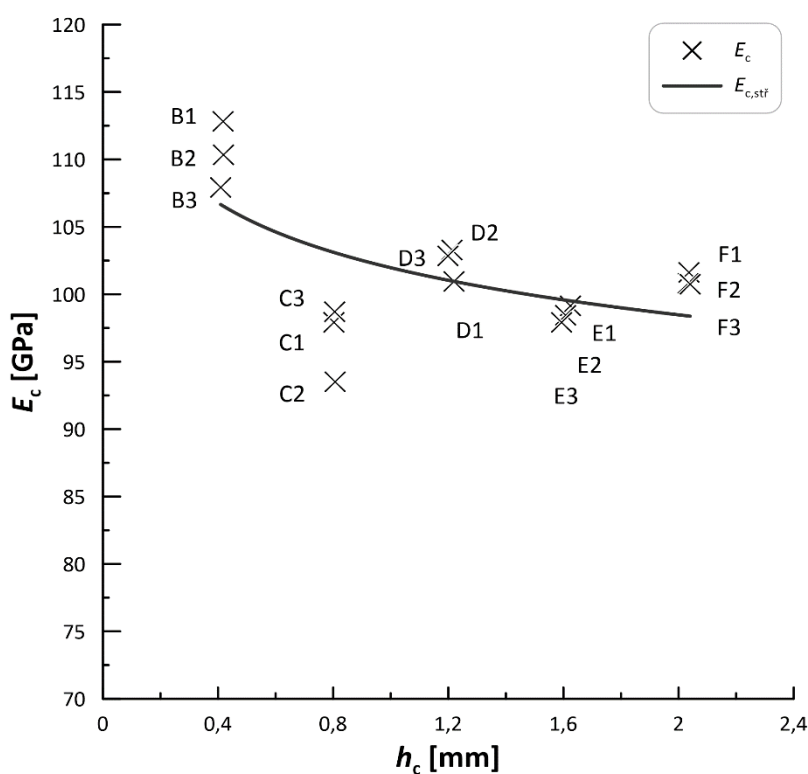
Obrázek 5.5 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Pautrotův model

#### 5.4.4 Berryho model

Hodnoty modulu pružnosti povlaku  $E_c$  jednotlivých zkušebních těles, vypočtené podle Berryho modelu [34] (rovnice (3.30)) jsou obsaženy v tab. 11. Experimentálními hodnotami byla v tomto případě proložena závislost  $E_c = 101,97 h_c^{-0,050}$  [GPa].

Tabulka 11: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Berryho modelu

Čís. vzorku	B1	B2	B3
$E_c$ [GPa]	112,83	110,34	107,92
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$110,36 \pm 2,00$	
Čís. vzorku	C1	C2	C3
$E_c$ [GPa]	97,92	93,52	98,70
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$96,71 \pm 2,28$	
Čís. vzorku	D1	D2	D3
$E_c$ [GPa]	100,95	103,29	102,83
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$102,36 \pm 1,01$	
Čís. vzorku	E1	E2	E3
$E_c$ [GPa]	99,14	98,45	97,92
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$98,50 \pm 0,50$	
Čís. vzorku	F1	F2	F3
$E_c$ [GPa]	101,61	100,81	100,73
$E_{c,stř} \pm s$ [GPa]		$101,05 \pm 0,4$	



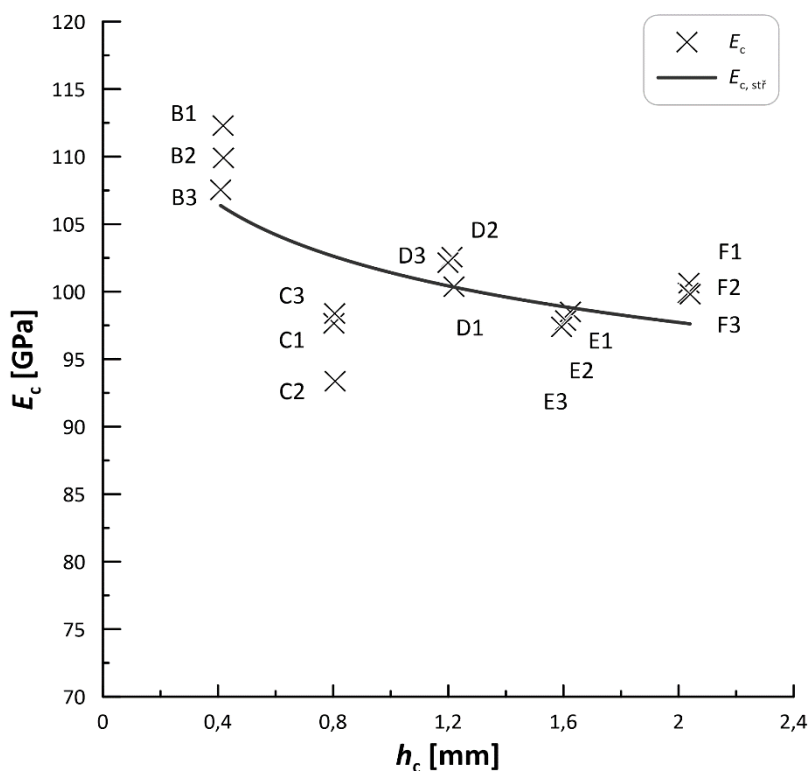
Obrázek 5.6 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Berryho model

### 5.4.5 Whitingův model

S použitím rovnice (3.31) byly dopočítány hodnoty modulu pružnosti v tahu  $E_c$  povlaku jednotlivých vzorků podle Whitingova modelu [35] [36], viz tab. 12. V grafu na obr. 5.7 jsou hodnoty modulu pružnosti  $E_c$  uvedeny v závislosti na tloušťce povlaku  $h_c$ , přičemž křivka, kterou jsou experimentální hodnoty proloženy má tvar mocninné funkce  $E_c = 100,41 h_c^{-0,053}$  [GPa].

Tabulka 12: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Whitingova modelu

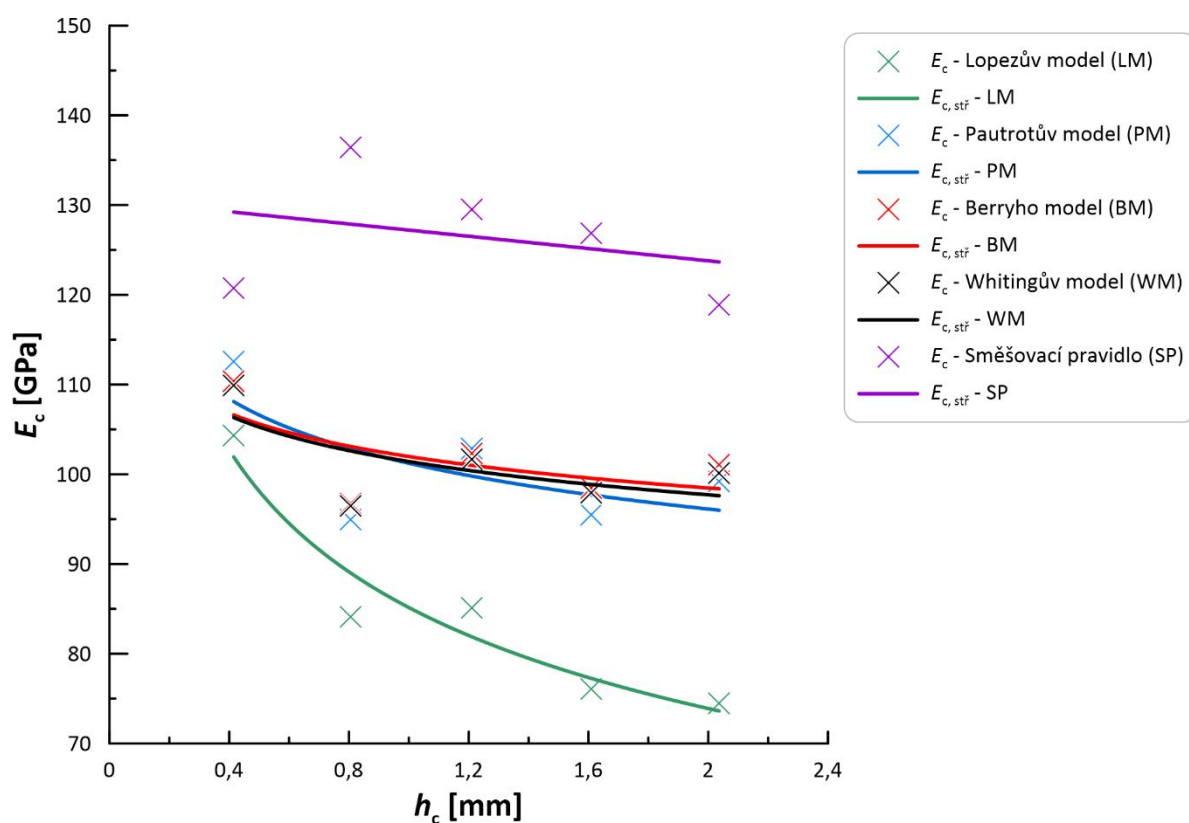
Čís. vzorku	B1	B2	B3
$E_c$ [GPa]	112,30	109,89	107,55
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$109,92 \pm 1,94$	
Čís. vzorku	C1	C2	C3
$E_c$ [GPa]	97,64	93,36	98,39
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$96,46 \pm 2,21$	
Čís. vzorku	D1	D2	D3
$E_c$ [GPa]	100,37	102,56	102,15
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$101,70 \pm 0,95$	
Čís. vzorku	E1	E2	E3
$E_c$ [GPa]	98,50	97,87	97,38
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$97,92 \pm 0,46$	
Čís. vzorku	F1	F2	F3
$E_c$ [GPa]	100,63	99,89	99,81
$E_{c, stř} \pm s$ [GPa]		$100,11 \pm 0,37$	



Obrázek 5.7 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Whitingův model

### 5.4.6 Srovnání použitých modelů

Přehledné srovnání výsledků, získaných prostřednictvím jednotlivých výpočetních modelů použitých v předložené práci je uvedeno v grafu na obr. 5.8. V grafu zobrazené hodnoty modulů pružnosti v tahu  $E_c$  reprezentují průměrné hodnoty modulů pružnosti sérií zkušebních těles s jednou tloušťkou vrstvy, získané pomocí každého z uvedených modelů. Střední hodnoty závislostí  $E_c = E_c(h_c)$ , tj. křivky, kterými jsou jednotlivé závislosti proloženy mají parametry shodné s parametry křivek, uvedenými v kap. 5.4.1 až 5.4.5.



Obrázek 5.8 – Srovnání jednotlivých výpočetních modelů použitých pro určení Youngova modulu pružnosti povlaku

## 6 Diskuze

Z naměřených hodnot modulu pružnosti  $E$  a rezonanční frekvence  $f_{RF}$  systémů substrát–povlak, uvedených v tabulce 7 a zobrazených v grafech na obr. 5.1 a obr. 5.2 je zřejmé, že s rostoucí tloušťkou povlaku dochází k lineárnímu růstu jak rezonanční frekvence, tak Youngova modulu. V práci [47], zabývající se určováním modulu pružnosti v tahu a rezonančních frekvencí povlaků, vytvořených pomocí sprejového nanášení vrstev barvy na substrát byl zjištěn trend opačný. Ve zmíněné práci docházelo s vyšším počtem vrstev barvy (tedy s větší tloušťkou povlaku) k poklesu rezonanční frekvence i Youngova modulu pružnosti vzorku. Tato skutečnost svědčí o vlivu materiálu povlaku na podobu jednotlivých závislostí.

O určování tloušťky povlaku v závislosti na rezonanční frekvenci a materiálových charakteristikách pojednávají autoři práce [48], kterým se podařilo pomocí impulzní excitační metody určit tloušťku tenkého zinkového povlaku vytvořeného galvanizací.

V případě vzorků řady C došlo při jejich zpracování k chybě a oproti ostatním zkušebním tělesům byly z polotovarů odebrány ve směru kolmém vzhledem k orientaci substrátu (ke směru válcování), zatímco zkušební tělesa ostatních sérií byla odebrána ve směru podélném. Vzhledem k faktu, že modul pružnosti v tahu je směrově závislá veličina, je možné, že tato chyba mohla ovlivnit následné měření a výpočty, což je rozebíráno dále v této kapitole.

Modul pružnosti v tahu kompaktní čisté mědi (angl. „bulk material“) je podle literatury roven 129,8 GPa. Bylo ale prokázáno, že modul pružnosti v tahu měděného nástřiku je nižší než u materiálů v kompaktní formě a může dojít k poklesu až na hodnotu okolo 80 GPa v závislosti na kvalitě použitého prášku a podmínkách při nástřiku. Hodnotu Youngova modulu u nástřiků vytvořených pomocí technologie CS je možno zvýšit pomocí následného tepelného zpracování, a to až na hodnotu 115 GPa. [49]

Další literární zdroj uvádí hodnotu modulu pružnosti v tahu u CS měděného nástřiku tloušťky 3 mm rovnu 104 GPa při měření pomocí impulzní indentační metody a 98 GPa u stejného nástřiku měřeného pomocí indentace. Rozdílnost hodnot modulu pružnosti v tahu, naměřených pomocí impulzní excitační metody a indentace dokazuje rozdíl mezi hodnotami Youngova modulu získanými prostřednictvím dynamických a statických metod měření. [46] V prezentované práci je vliv nehomogenit nástřiku, způsobujících pokles Youngova modulu, zanedbán a předpokládá se, že hodnota modulu pružnosti v tahu, která by měla být určena pomocí výpočetních modelů odpovídá hodnotě kompaktní formy čisté mědi, tj. hodnotě 129,8 GPa.

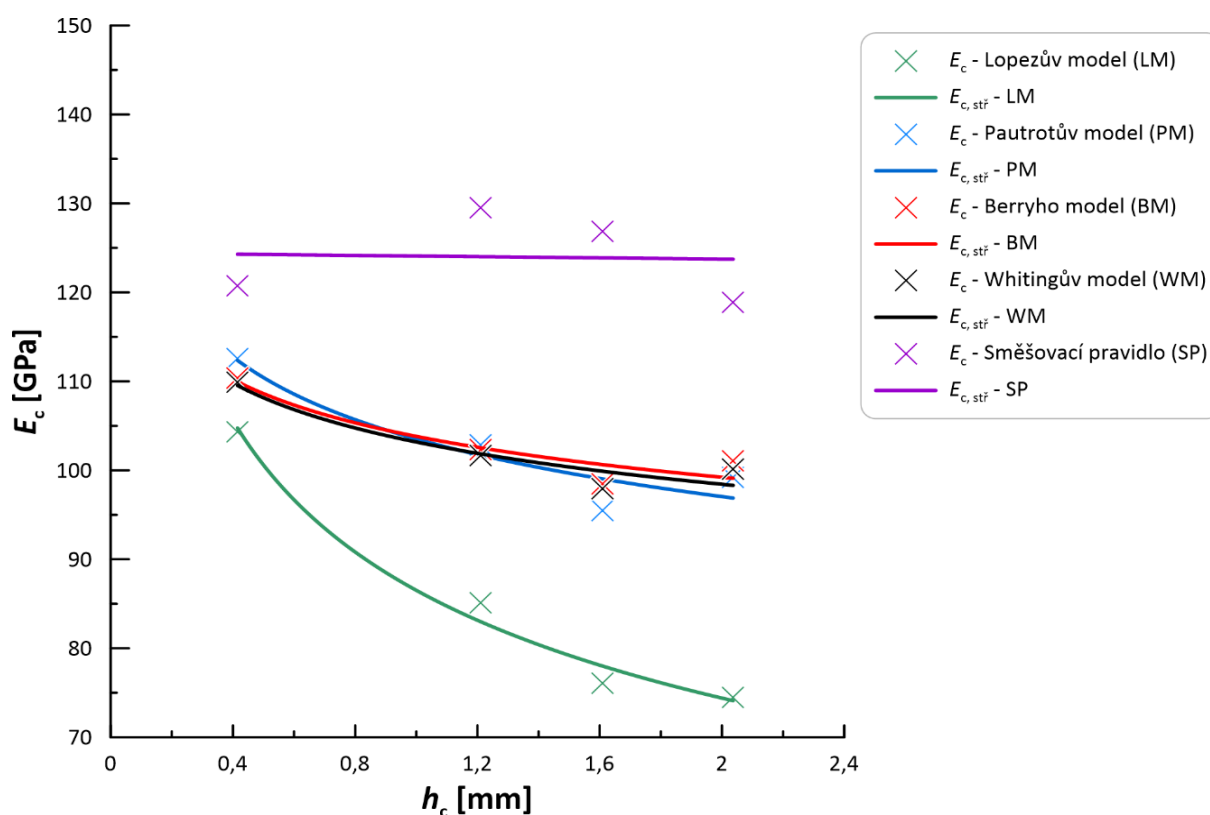
Lopezův model (viz obr. 5.4 a obr. 5.8) se pro námi zvolenou kombinaci materiálů a geometrii nástřiku ukázal jako zcela nevyhovující, jelikož u něj dochází k významnému poklesu vypočteného Youngova modulu povlaku s jeho rostoucí tloušťkou. Tato skutečnost neodpovídá grafu na obr. 5.1, kde s rostoucí tloušťkou povlaku dochází k nárůstu modulu pružnosti v tahu zkušební tělesa, tudíž modul pružnosti povlaku musí být buď stejný nebo vyšší při rostoucí tloušťce povlaku, ale nemůže docházet k jeho poklesu.

Pautrotův model (viz obr. 5.8) by měl být podle literatury nejpřesnější z používaných modelů, jelikož uvažuje posun neutrální osy po nanesení povlaku. Toto je potvrzeno tím, že

u něj dochází k mírnějšímu poklesu Youngova modulu při růstu tloušťky povlaku než u modelu Lopezova. Podobně mírný pokles hodnot nastává u Whitingova modelu, který z Pautrotova modelu vychází i u modelu Berryho, založeného na modelu Lopezově. [34]

Z použitých modelů pro výpočet modulu pružnosti v tahu povlaku, souhrnně uvedených na obr. 5.8, se hodnotě Youngova modulu pružnosti v tahu kompaktní formy čisté mědi (129,8 GPa) přiblížil nejvíce model založený na směšovací rovnici. Průměry hodnot Youngova modulu určených pomocí směšovacího pravidla (viz tab. 8) pro jednotlivé tloušťky povlaku se pohybují od  $118,86 \pm 2,22$  GPa do  $136,46 \pm 4,13$  GPa. Nejvyšších hodnot modulu pružnosti nabývají vzorky skupiny C s odlišnou orientací zkušebních těles vzhledem ke směru tváření substrátu. V případě Lopezova modelu, jak bylo zmíněno výše, dochází k významnému poklesu hodnot  $E_c$  až na hodnotu  $74,48 \pm 0,55$  GPa. Pautrotův, Whitingův a Berryho model vykazují mírný pokles hodnot Youngova modulu s narůstající tloušťkou povlaku. Rozdíly mezi průměry modulů pružnosti v tahu povlaků stejných tlouštěk vypočítaných podle zmíněných tří modelů se liší v jednotkách GPa.

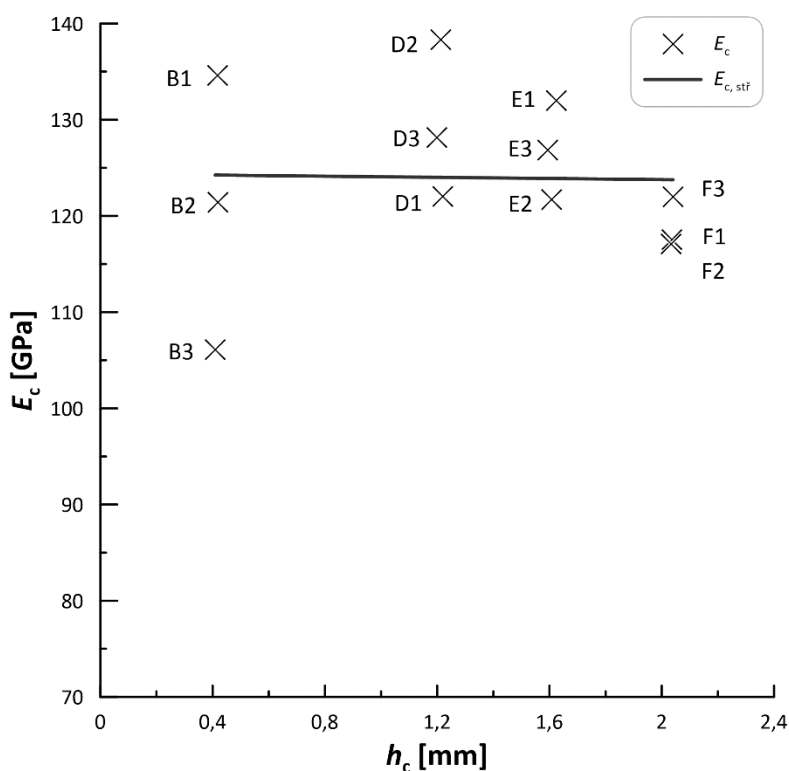
Protože u zkušebních těles řady C (přibližná tloušťka povlaku 0,8 mm) došlo při výrobě zkušebních těles k záměně orientace těles vůči směru tváření substrátu, bylo ověřeno chování všech diskutovaných modelů pro případ zanedbání uvedené série vzorků. Souhrnně jsou výsledky analýzy uvedeny v grafu na obr. 6.1, který je založen na stejných výsledcích výpočtů jako graf na obr. 5.8.



Obrázek 6.1 – Srovnání použitých modelů při zanedbání zkušebních těles řady C



Z grafu je patrné, že po zanedbání těles série C došlo ke změně sklonu přímky reprezentující směšovací pravidlo a která je nyní téměř rovnoběžná s osou grafu udávající tloušťku povlaku, což znamená, že modul pružnosti povlaku nezávisí na jeho tloušťce ani pro relativně tlusté vrstvy. Zbývající modely nadále vykazují pokles hodnot modulu pružnosti v tahu s rostoucí tloušťkou povlaku. U všech modelů byl po odstranění hodnot vzorků skupiny C pozorován nárůst koeficientu determinace při analýze rozptylu a prokládání experimentálních dat mocninou, resp. lineární funkcí.



Obrázek 6.2 – Vypočtené hodnoty modulu pružnosti v tahu povlaku pomocí směšovacího pravidla při zanedbání vzorků skupiny C

V grafu na obr. 6.2 jsou uvedeny vypočtené hodnoty modulu pružnosti v tahu pomocí směšovacího pravidla reprezentující všechna zkušební tělesa kromě těles řady C. Tyto hodnoty byly opět proloženy lineární funkcí, která má v tomto případě tvar  $E_c = -0,30 h_c + 124,37$  [GPa]. Sklon přímky reprezentovaný zmíněnou funkcí je velmi mírný a přímka je téměř rovnoběžná s osou udávající tloušťku povlaku. Pro nejmenší tloušťku povlaku (cca 0,4 mm) vychází z uvedené rovnice modul pružnosti povlaku  $E_c = 124,25$  GPa, v případě největší tloušťky (cca 2 mm) obdržíme hodnotu  $E_c = 123,77$  GPa. Vzhledem k faktu, že směrodatné odchylky se při výpočtech pomocí směšovacího pravidla pohybovaly v řádech jednotek GPa, lze považovat modul pružnosti v tahu povlaku  $E_c$  za prakticky nezávislý na tloušťce povlaku. Tento závěr se shoduje se závěry dříve zmiňované práce [47], kde bylo zjištěno, že modul pružnosti nanesené barvy je taktéž nezávislý na tloušťce vrstvy barvy.

Námětem pro další studium by mohlo být ověření jednotlivých modelů i pro povlaky vyrobené technologií CS menších, případně větších tlouštěk. Jelikož Pautrotův, Berryho a Whitingův model vykazují nejvyšší hodnotu vypočteného modulu pružnosti v tahu pro nejmenší použitou tloušťku povlaku (tj. cca 0,4 mm), je pravděpodobné, že pro menší tloušťky povlaku by vypočtené moduly pružnosti v tahu byly vyšší a přiblížily se tak hodnotám vypočteným za pomoci směšovací rovnice. Tuto myšlenku podporuje také fakt, že zmíněné tři modely jsou převážně používány pro určování modulů pružnosti povlaků menších tlouštěk (např. povlaky tloušťky do 0,1 mm v práci [50]) než jsou povlaky použité v předkládané práci.

## 7 Závěr

V práci byla řešena problematika určování modulu pružnosti v tahu povlaků pomocí impulzní excitační metody. V rámci řešení této problematiky byla zpracována teoretická část práce rozebírající technologie přípravy nástřiků, teoretické základy impulzní excitační metody a modely kompozitních materiálů. Na teoretickou část navazovala část experimentální, kde bylo připraveno 18 zkušebních těles, z toho 15 s povlakem naneseným pomocí technologie Cold Spray. Pro určení rezonančních frekvencí a modulů pružnosti v tahu zkušebních těles byla použita impulzní excitační metoda. Pomocí pěti kompozitních modelů – směšovacího pravidla, Lopezova, Pautrotova, Berryho a Whitingova modelu byly z hodnot modulů pružnosti v tahu zkušebních těles vypočítány hodnoty modulů pružnosti v tahu povlaků na nich nanesených.

Bylo zjištěno, že s rostoucí tloušťkou povlaku dochází k růstu rezonanční frekvence a Youngova modulu pružnosti zkušebních těles. V případě hodnot modulu pružnosti v tahu povlaků, vypočtených pomocí uvedených kompozitních modelů, dochází s rostoucí tloušťkou povlaku k jejich poklesu. Z použitých kompozitních modelů se pro použité tloušťky povlaku prokázal jako vyhovující pouze model založený na směšovací rovnici, kdy střední hodnota modulu vypočítaná pomocí tohoto modelu (124,4 GPa) byla nejbližší hodnotě Youngova modulu čisté mědi, který činí 129,8 GPa. Dále bylo prokázáno, že střední hodnota modulu pružnosti v tahu vypočítaná pomocí směšovacího pravidla je nezávislá na tloušťce povlaku, což je v souladu s údaji, nalezenými v literatuře. Zbývající modely se prokázaly jako nevyhovující pro tloušťky povlaku použité v rámci této práce, a to z důvodu nadměrného poklesu hodnot vypočítaných modulů pružnosti v tahu s rostoucí tloušťkou povlaku.

V práci zjištěné závislosti mezi tloušťkou povlaku a rezonanční frekvencí naznačují, že pomocí impulzní excitační metody by mohlo být možné měřit tloušťky povlaků, rovněž tak funkční závislost reprezentující směšovací pravidlo dokazuje, že je možno použít tento kompozitní model k určení modulu pružnosti v tahu povlaku tloušťky v řádu milimetrů. Obě tato zjištění budou do budoucna vyžadovat další výzkum, a to hlavně s ohledem na ověření zjištěných závislostí pro statisticky větší soubor hodnot, než byl použit v předložené práci.

## 8 Literatura

- [1] MALZBENDER, J., J.M.J. DEN TOONDER, A.R. BALKENENDE a G. DE WITH. Measuring mechanical properties of coatings: a methodology applied to nano-particle-filled sol–gel coatings on glass. *Materials Science and Engineering: R: Reports* [online]. 2002, **36**(2-3), 47-103 [cit. 2021-03-24]. ISSN 0927796X. Dostupné z: doi:10.1016/S0927-796X(01)00040-7
- [2] TOGNANA, Sebastián, Walter SALGUEIRO, Alberto SOMOZA a Angel MARZOCCA. Measurement of the Young's modulus in particulate epoxy composites using the impulse excitation technique. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2010, **527**(18-19), 4619-4623 [cit. 2021-03-23]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2010.04.083
- [3] E1876 – 15. *Standard Test Method for Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio by Impulse Excitation of Vibration*. 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. United States: ASTM International, 2016.
- [4] Cold Spray vs Thermal Spray – An Overview. *VRC Metal Systems* [online]. 600 N Ellsworth Rd Box Elder, SD 57719: VRC Metal Systems [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://vrcmetalsystems.com/blog-post/cold-spray-vs-thermal-spray/>
- [5] SINGH, Harminder, T.S. SIDHU a S.B.S. KALSI. Cold spray technology: future of coating deposition processes. *Frattura ed Integrità Strutturale* [online]. 2012, **6**(22), 69-84 [cit. 2021-03-22]. ISSN 19718993. Dostupné z: doi:10.3221/IGF-ESIS.22.08
- [6] Cold Gas spray. In: *Flame spray technologies* [online]. Flame Spray Technologies B.V., 2021 [cit. 2021-03-26]. Dostupné z: <https://www.fst.nl/images/products/technology/cold-gas-spray.jpg>
- [7] Cold spray technology. *Impact innovations* [online]. Impact Innovations GmbH, 2020 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://impact-innovations.com/en/technology/>
- [8] Cold Spraying - Cold Spray Coating Deposition. *TWI* [online]. TWI, 2021 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.twi-global.com/what-we-do/research-and-technology/technologies/coating-and-surface-engineering/cold-spraying>
- [9] Materials for Cold Spraying. *Impact innovations* [online]. Impact Innovations GmbH, 2020 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://impact-innovations.com/en/materials/>
- [10] FERNANDEZ, Ruben a Bertrand JODOIN. Cold Spray Aluminum–Alumina Cermet Coatings: Effect of Alumina Content. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2018, **27**(4), 603-623 [cit. 2021-03-22]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-018-0702-6

- [11] AMIN, Sagar a Hemant PANCHAL. A Review on Thermal Spray Coating Processes. *International Journal of Current Trends in Engineering & Research (IJCTER)* [online]. 2016, 2(4), 556-563 [cit. 2021-03-22]. ISSN 2455–1392. Dostupné z: <http://poudrafshan.com/wp-content/uploads/2019/05/A-Review-on-Thermal-Spray-Coating-Processes-1.pdf>
- [12] The History of Thermal Spray in a Nutshell. *A&A Thermal Spray Coatings* [online]. A&A Thermal Spray Coatings [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.thermalspray.com/the-history-of-thermal-spray-in-a-nutshell/>
- [13] Requirements for Substrate Preparation for BryCoat Thin Film Coatings. *Brycoat* [online]. BryCoat Inc. [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.brycoat.com/brycoat-resources/requirements-for-substrate-preparation-for-brycoat-thin-film-coatings/>
- [14] HVOF Spray. In: *Griekspoor Thermal Coatings* [online]. [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.griekspoorthermalcoatings.com/images/thermal-coatings/HVOF-spraying2.png>
- [15] Understanding The Pros & Cons Of HVOF Spraying. *A&A Thermal Spray Coatings* [online]. New York: Thermal Spray Coatings [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.thermalspray.com/understanding-the-pros-cons-of-hvof-spraying/>
- [16] What is Thermal Spray Coating?. *Precision Coatings, Inc.* [online]. Precision Coatings, Inc., 2017 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <http://www.precisioncoatings.com/what-is-thermal-spray/#plasmaspray>
- [17] *SAM Thermal Spray Technology* [online]. Brno: PP Soft, 2021 [cit. 2021-03-22]. Dostupné z: <https://www.sammatal.cz/en/technology/thermal-spray-and-plasma-applications/>
- [18] FARRISSEY, L.M. a P.E. MCHUGH. Determination of elastic and plastic material properties using indentation: Development of method and application to a thin surface coating. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2005, 399(1-2), 254-266 [cit. 2021-03-22]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2005.03.109
- [19] TRINDADE, ALVES, OTANI a AMICO. Characterization of the elastic moduli of composite materials by the impulse excitation technique. *Researchgate* [online]. 2014 [cit. 2021-05-17]. Dostupné z: [shorturl.at/mnKW6](https://shorturl.at/mnKW6)
- [20] ROEBBEN, G., B. BOLLEN, A. BREBELS, J. VAN HUMBEECK a O. VAN DER BIEST. Impulse excitation apparatus to measure resonant frequencies, elastic moduli, and internal friction at room and high temperature. *Review of Scientific Instruments* [online]. 1997, 68(12), 4511-4515 [cit. 2021-03-22]. ISSN 0034-6748. Dostupné z: doi:10.1063/1.1148422
- [21] ROEBBEN, G, B BASU, J VLEUGELS, J VAN HUMBEECK a O VAN DER BIEST. The innovative impulse excitation technique for high-temperature mechanical

- spectroscopy. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. 2000, **310**(1-2), 284-287 [cit. 2021-03-23]. ISSN 09258388. Dostupné z: doi:10.1016/S0925-8388(00)00966-X
- [22] LORD, Jerry a Roger MORRELL. *Measurement Good Practice Guide No. 98: Elastic Modulus Measurement* [online]. 1. Hampton Road, Teddington, Middlesex, TW11 0LW: National Physical Laboratory, 2006 [cit. 2021-03-30]. ISSN 1744-3911. Dostupné z: [https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg98\\_elastic](https://www.npl.co.uk/special-pages/guides/gpg98_elastic)
- [23] Impulse Excitation Technique: Study of Elastic and Damping Properties. *KU Leuven* [online]. LEUVEN: KU Leuven, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.mtm.kuleuven.be/onderzoek/siem/Ceramics/old-info/IET>
- [24] Standing waves review. *Khan academy* [online]. Khan Academy, 2021 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/science/high-school-physics/waves-and-sound/standing-waves-2/a/standing-waves-review-ap>
- [25] VLACH, Bohumil. Pružnost. *Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. FSI VUT, 2012 [cit. 2021-04-13]. Dostupné z: [http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni\\_stavy/podklady/02%20-%20Pruznost.pdf](http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/mezni_stavy/podklady/02%20-%20Pruznost.pdf)
- [26] IMCE Theory. *IMCE* [online]. Genk: IMCE, 2020 [cit. 2021-03-23]. Dostupné z: <https://www.imce.eu/theory>
- [27] BOURSIER NIUTTA, Carlo, Andrea TRIDELLO, Giovanni BELINGARDI a Davide Salvatore PAOLINO. Nondestructive determination of local material properties of laminated composites with the impulse excitation technique. *Composite Structures* [online]. 2021, **262** [cit. 2021-04-19]. ISSN 02638223. Dostupné z: doi:10.1016/j.compstruct.2021.113607
- [28] VRBKA, Jan. *Mechanika kompozitů* [online]. Brno: Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně, 2008 [cit. 2021-03-30]. Dostupné z: [shorturl.at/IDLQT](http://shorturl.at/IDLQT)
- [29] CALLISTER, William a David RETHWISCH. *Materials Science and Engineering*. 9. Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-31922-2.
- [30] OTANI, L.B. a A.H.A. PEREIRA. Elastic Moduli characterization of composites using the Impulse Excitation Technique. *ATCP Physical Engineering Sonelastic Division* [online]. 2017 [cit. 2021-05-03]. Dostupné z: <https://www.sonelastic.com/images/ITC-06-IET-MOE-Composites-v1.4.pdf>
- [31] VIGNOLI, Lucas L., Marcelo A. SAVI, Pedro M.C.L. PACHECO a Alexander L. KALAMKAROV. Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae. *Composites Part B: Engineering* [online]. 2019, **174** [cit. 2021-05-03]. ISSN 13598368. Dostupné z: doi:10.1016/j.compositesb.2019.106961

- [32] HALPIN, JC. Effects of Environmental Factors on Composite Materials. *AIR FORCE MATERIALS LAB WRIGHT-PATTERSON AFB OH* [online]. 1960 [cit. 2021-04-20]. Dostupné z: <https://apps.dtic.mil/sti/pdfs/ADA306357.pdf>
- [33] SPINNER, S., T.W. REICHARD a W.E. TEFFT. A comparison of experimental and theoretical relations between Young's modulus and the flexural and longitudinal resonance frequencies of uniform bars. *Journal of research of the National Bureau of Standards. Section A, Physics and chemistry* [online]. 1960, **64**(2), 147-155 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5287258/>
- [34] SLIM, M.F., A. ALHUSSEIN, A. BILLARD, F. SANCHETTE a M. FRANCOIS. On the determination of Young's modulus of thin films with impulse excitation technique. *Journal of Materials Research* [online]. 2017, **32**(3), 497-511 [cit. 2021-04-19]. ISSN 0884-2914. Dostupné z: doi:10.1557/jmr.2016.442
- [35] ZGHEIB, Elia, Akram ALHUSSEIN, Mohamed Fares SLIM, Khaled KHALIL a Manuel FRANÇOIS. Multilayered models for determining the Young's modulus of thin films by means of Impulse Excitation Technique. *Mechanics of Materials* [online]. 2019, **137** [cit. 2021-04-19]. ISSN 01676636. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechmat.2019.103143
- [36] WHITING, R., M.A. ANGADI a S. TRIPATHI. Evaluation of elastic moduli in thin-film/substrate systems by the two-layer vibrating reed method. *Materials Science and Engineering: B* [online]. 1995, **30**(1), 35-38 [cit. 2021-05-20]. ISSN 09215107. Dostupné z: doi:10.1016/0921-5107(94)01133-8
- [37] Aluminium Alloys - Aluminium 5083 Properties, Fabrication and Applications. <https://www.azom.com/> [online]. AZoNetwork, 2021 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=2804>
- [38] EN AW-5083 0/H11 (AlMg4,5Mn W28). *ALUNET* [online]. ALUNET.cz, 2021 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <http://www.alunet.cz/ENAW-5083>
- [39] *Gleich aluminium Technický list pro EN AW 5083* [online]. Gleich aluminium s.r.o [cit. 5-5-2021]. Dostupné z: [https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2016/07/cz\\_en\\_aw\\_5083.pdf](https://gleich.de/cz/wp-content/uploads/sites/8/2016/07/cz_en_aw_5083.pdf)
- [40] SAFINA A.S. *Materiálový list pro 99,5% Cu prášek*.
- [41] Impact Cold Spray System 5/11. In: *Impact innovations* [online]. Impact Innovations GmbH, 2020 [cit. 2021-05-05]. Dostupné z: <https://impact-innovations.com/wp-content/uploads/2020/06/Impact-System-5.11-2.jpg>
- [42] ČSN EN 485-2+A1. *Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky – Část 2: Mechanické vlastnosti*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2019.

- [43] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Česká agentura pro standardizaci, 2021.
- [44] DIN 50125. *Testing of metallic materials - Tensile test pieces*. Deutsches Institut für Normung E.V. (DIN), 2016.
- [45] Copper. *Periodic table* [online]. Royal Society of Chemistry 2021, 2021 [cit. 2021-05-18]. Dostupné z: <https://www.rsc.org/periodic-table/element/29/copper>
- [46] LUZIN, V., K. SPENCER a M.-X. ZHANG. Residual stress and thermo-mechanical properties of cold spray metal coatings. *Acta Materialia* [online]. 2011, **59**(3), 1259-1270 [cit. 2021-05-16]. ISSN 13596454. Dostupné z: doi:10.1016/j.actamat.2010.10.058
- [47] SURKHI, Omar, Raed MA'ALI, Shadi SAWALHA, Areen LAISSOUN, Khulood HUSSEIN a Nancy YAMAN. Determination the Properties of Paint Coating and Coating-Substrate System Using Impulse Excitation Technique. *The Journal of Scientific and Engineering Research* [online]. 2018, **5**(4), 350-357 [cit. 2021-05-20]. ISSN 2394-2630. Dostupné z: [shorturl.at/zAHS5](http://shorturl.at/zAHS5)
- [48] BERETEU, Liviu, Eva NYAGULY, Gheorghe DRAGANESCU a Dorin SIMOIU. Determination of Coating Thickness Using Impulse Excitation and Laser Measurements. *Applied Mechanics and Materials* [online]. 2015, **801**, 323-327 [cit. 2021-05-20]. ISSN 1662-7482. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.801.323
- [49] SUNDARARAJAN, G., Naveen M. CHAVAN a S. KUMAR. The Elastic Modulus of Cold Spray Coatings: Influence of Inter-splat Boundary Cracking. *Journal of Thermal Spray Technology* [online]. 2013, **22**(8), 1348-1357 [cit. 2021-05-20]. ISSN 1059-9630. Dostupné z: doi:10.1007/s11666-013-0034-5
- [50] BELLAN, C. a J. DHERS. Evaluation of Young modulus of CVD coatings by different techniques. *Thin Solid Films* [online]. 2004, **469-470**, 214-220 [cit. 2021-05-20]. ISSN 00406090. Dostupné z: doi:10.1016/j.tsf.2004.08.182



## 9 Seznam použitých zkratk a symbolů

### Zkratky

CVD – Chemical Vapor Deposition (chemická depozice z plynné fáze)

PVD – Physical Vapor Deposition (fyzikální depozice z plynné fáze)

CS – Cold Spray (kinetická depozice za studena)

HVOF – High Velocity Oxy Fuel (vysokorychlostní nástřik s kyslíkem a palivem)

IEM – impulzní excitační metoda

MKP – metoda konečných prvků

RFDA – Resonance Frequency Damping Analysis

### Symboly

$v_{\xi}$  – rychlost částic

$v_k$  – rychlost kritická

$v_e$  – erozní rychlost

$E$  – modul pružnosti v tahu

$Q^{-1}$  – vnitřní tření

$L$  – délka vzorku

$G$  – modul pružnosti ve smyku

$\nu$  – Poissonův poměr

$f_{RF}$  – rezonanční frekvence v ohybovém módu měření

$m$  – hmotnost vzorku

$b$  – šířka vzorku

$t$  – tloušťka vzorku

$T$  – korekční faktor pro výpočet modulu pružnosti v tahu při ohybovém módu měření

$f_{RL}$  – rezonanční frekvence v podélném módu měření

$K$  – korekční faktor pro výpočet modulu pružnosti v tahu při podélném módu měření

$f_{RT}$  – rezonanční frekvence v torzním módu měření

$R$  – korekční faktor pro výpočet modulu pružnosti ve smyku při torzním módu měření

$E_1$  – modul pružnosti v tahu v podélném směru

$E_2$  – modul pružnosti v tahu v příčném směru

$E_f$  – modul pružnosti v tahu vláken

$E_m$  – modul pružnosti v tahu matrice

$V_f$  – objemový podíl vláken v kompozitu  
 $V_m$  – objemový podíl matrice v kompozitu  
 $v_f$  – objem vláken  
 $v_m$  – objem matrice  
 $v_c$  – objem kompozitu  
 $\xi$  – parametr míry vyztužení kompozitu  
 $\eta$  – výpočetní parametr pro model Halpin – Tsai  
 $l$  – délka vlákna kompozitu  
 $d$  – průměr vlákna kompozitu  
 $X_n$  – konstanta vyjadřující okrajové podmínky  
 $I$  – kvadratický moment tělesa  
 $\rho$  – hustota  
 $S$  – plocha  
 $R_f$  – poměr rezonančních frekvencí  
 $f_t$  – rezonančních frekvence vzorku  
 $f_s$  – rezonančních frekvence substrátu  
 $R_E$  – poměr modulů pružnosti v tahu  
 $E_c$  – modul pružnosti v tahu povlaku  
 $E_s$  – modul pružnosti v tahu substrátu  
 $h_c$  – tloušťka povlaku  
 $h_s$  – tloušťka substrátu  
 $R_h$  – poměr tlouštěk  
 $\rho_c$  – hustota povlaku  
 $\rho_s$  – hustota substrátu  
 $R_p$  – poměr hustot  
 $R_{p0,2}$  – smluvní mez kluzu  
 $R_m$  – mez pevnosti  
 $A_g$  – homogenní tažnost  
 $A$  – tažnost  
 $E_{stř}$  – střední hodnota modulu pružnosti  
 $f_{RF,stř}$  – střední hodnota rezonanční frekvence pro ohybový mód měření  
 $s$  – směrodatná odchylka

## 10 Seznam obrázků a tabulek

### Seznam obrázků:

Obrázek 3.1 – Sestava pro Cold Spray, převzato a upraveno z [6]

Obrázek 3.2 – Deformace částic v závislosti na jejich rychlosti, převzato a upraveno z [7]

Obrázek 3.3 – Technologie HVOF, převzato a upraveno z [14]

Obrázek 3.4 – Graf závislosti amplitudy vibrací na čase a amplitudy na rezonanční frekvenci, převzato a upraveno z [19]

Obrázek 3.5 – Sestava pro měření v peci za vyšších teplot, převzato a upraveno z [21]

Obrázek 3.6 – Sestava pro ohybový mód mimo rovinu, upraveno dle [3]

Obrázek 3.7 – Sestava pro ohybový mód v rovině, upraveno dle [3]

Obrázek 3.8 – Sestava pro torzní mód, upraveno dle [3]

Obrázek 3.9 – Sestava pro podélný mód, upraveno dle [3]

Obrázek 3.10 – Dělení kompozitů, upraveno dle [29]

Obrázek 3.11 – Značení směrů v kompozitu, převzato z [31]

Obrázek 4.1 – Zařízení Impact Innovations Cold Spray system 5/11 [41]

Obrázek 4.2 – Substrát s povlakem po dokončení nástřiku pomocí technologie CS

Obrázek 4.3 – Zkušební tělesa

Obrázek 4.4 – Zkušební tělesa řady F, boční pohled

Obrázek 4.5 – Sestava pro měření pomocí IEM

Obrázek 4.6 – Softwarové rozhraní pro výstup z měření pomocí IEM

Obrázek 5.1 – Graf závislosti Youngova modulu pružnosti v tahu na tloušťce povlaku

Obrázek 5.2 – Graf závislosti rezonanční frekvence na tloušťce povlaku

Obrázek 5.3 – Závislost Youngova modulu pružnosti v tahu povlaku na tloušťce povlaku – směšovací pravidlo

Obrázek 5.4 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Lopezův model

Obrázek 5.5 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Pautrotův model

Obrázek 5.6 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Berryho model

Obrázek 5.7 – Závislost Youngova modulu pružnosti povlaku na tloušťce povlaku – Whitingův model

Obrázek 5.8 – Srovnání jednotlivých výpočetních modelů použitých pro určení Youngova modulu pružnosti povlaku

Obrázek 6.1 – Srovnání použitých modelů při zanedbání zkušebních těles řady C

Obrázek 6.2 – Vypočtené hodnoty modulu pružnosti v tahu povlaku pomocí směšovacího pravidla při zanedbání vzorků skupiny C

### **Seznam tabulek:**

Tabulka 1: Technologie žárových nástřiků

Tabulka 2: Typy symetrie kompozitů

Tabulka 3: Označení polotovarů (deseek)

Tabulka 4: Materiálové charakteristiky substrátu

Tabulka 5: Rozměry a hmotnost zkušebních těles

Tabulka 6: Tloušťky vrstev povlaku a substrátu zkušebních těles

Tabulka 7: Rezonanční frekvence  $f_{RF}$ , tlumení  $Q^{-1}$  a moduly pružnosti v tahu  $E$  zkušebních těles

Tabulka 8: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí směšovacího pravidla

Tabulka 9: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Lopezova modelu

Tabulka 10: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Pautrota modelu

Tabulka 11: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Berryho modelu

Tabulka 12: Hodnoty  $E_c$  vypočtené pomocí Whitingova modelu

## Test report

Customer : Dr. L. Válka - DP D. Valášek  
 Test standard : CSN EN ISO 6892-1 (2021)  
 Material : EN AW 5083 H111, Sheet 8 mm, L Direction  
 Specimen type : DIN 50125, Form "E" 8.x25-80 mm  
 Tester : Dr. J. Zapletal  
 Machine data : Zwick/Roell Z250, Loadcell: 150 kN, Extensometer: MultiXtens  
 Pre-load : 2 MPa  
 Speed, Youngs Modulus : 0,00007 1/s  
 Test speed : 0,002 1/s

## Test results:

Legend	Specimen ID	a <sub>0</sub> mm	b <sub>0</sub> mm	E GPa	R <sub>p0.2</sub> MPa	F <sub>m</sub> N	R <sub>m</sub> MPa	R <sub>B</sub> MPa	A <sub>g</sub> %	A %
<span style="color: red;">■</span>	EN AW 5083 H111 - 1	8,01	25,07	72,70	163	63571	317	309	19,4	21,0
<span style="color: green;">■</span>	EN AW 5083 H111-2	8,02	25,13	73,36	164	64091	318	307	17,3	20,8

## Series graph:

